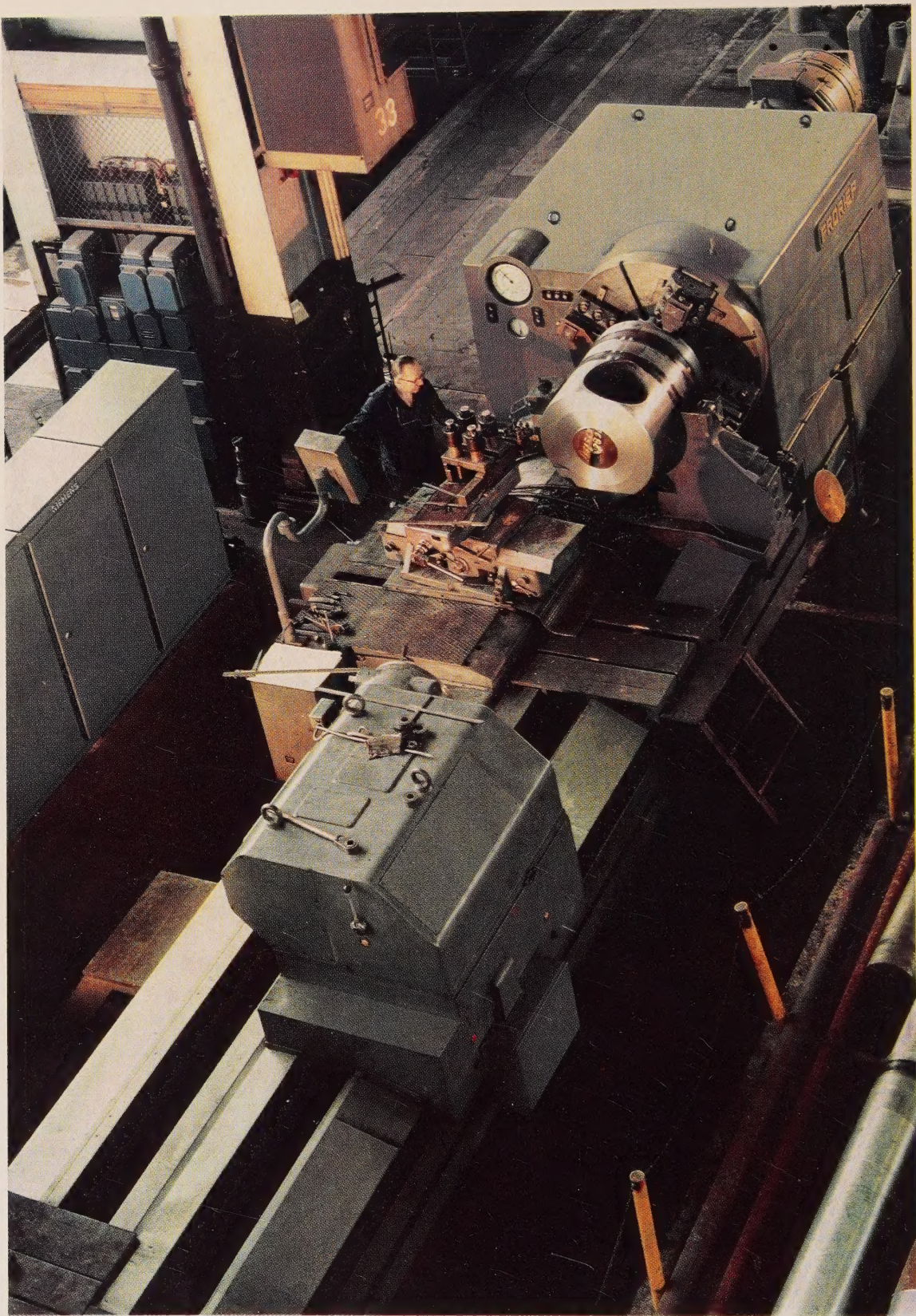


INHALT

MERZ	40 Jahre Entwicklung im Wernerwerk für Meßtechnik.....	557
FEIST	Rationalisierung durch numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen	567
SCHLICHT	Betriebsgüte-Meßeinrichtungen für Wahl-Vermittlungsanlagen	574
BURGER/LOTTE	Das Sennar-Burri-Projekt Zur Energieversorgung der Republik Sudan	579
LÖLKES/VOELCKER	Lochstreifengeräte für Sonderzwecke	585
SPEIDEL	Einfluß der Oberflächengüte auf den Wirkungsgrad von Dampfturbinen	591
MEILER/RAUCH	Selektivität von Installations-Schaltgeräten	598
DORENDORF/REBSTOCK	Der Germanium-Mesatransistor	602
UNGRUH	Theoretische und experimentelle Untersuchungen eines mechanischen Schwingungsdämpfers für elektrische Wellen	610
TECHNISCHE BERICHTE		
HAHN/ZENNECK	Das EMD-Wähler-Amt Maribyrnong in Melbourne	618
JETTER	Ton-Zusatzgerät für das Richtfunksystem FM 960-TV/4000.....	620
FUNKE	Selbsttätige Zuglenkung bei der Hamburger S-Bahn	622
BUCHBESPRECHUNGEN		623



Spitzendrehbank mit Leonardantrieb und TRANSIDYN-Regelung

Die installierte elektrische Leistung beträgt 200 kW. Der Hauptantrieb hat eine Stromregelung mit drehzahl geregelter Führungsgröße. Es werden Transistor-Zweipunktregler und Magnetverstärker verwendet

40 Jahre Entwicklung im Wernerwerk für Meßtechnik

VON LUDWIG MERZ

Das Wernerwerk für Meßtechnik kann in diesen Monaten auf ein vierzigjähriges Bestehen zurückblicken. Dies bedeutet indessen nicht, daß die Entwicklung des Messens und Regelns im Hause Siemens erst im Jahr 1921 begonnen hätte. Grundlegende Arbeiten und wichtige Erfindungen auf dem Gebiet der elektrischen und mechanischen Meßtechnik gehen bereits auf den Gründer des Hauses zurück. Sie gehören zur Geschichte des Hauses Siemens ebenso wie zur Geschichte der Meßtechnik. Nur einige dieser grundlegenden Arbeiten seien hier genannt.

Im Jahr 1860 schlug Werner Siemens vor, als reproduzierbares Widerstandsmaß den elektrischen Widerstand eines Quecksilberfadens von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0 °C anzunehmen. Damit war eine der wichtigsten Grundlagen für das elektrische Messen für viele Jahrzehnte geschaffen.

Die Pariser Kongresse von 1881 und 1884 über die Festsetzung der elektrischen Einheiten folgten dem Vorschlag von Werner Siemens, und auch der Kongreß von Washington im Jahre 1911 setzte ausdrücklich fest: »Das internationale Ohm ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 106,3 cm Länge bei 0 °C«. Erst im Jahr 1958 wurde der Quecksilberfaden als Prototyp für die Einheit des elektrischen Widerstandes verlassen und durch das »absolute« Ohm ersetzt.

Große Aufmerksamkeit hat Werner Siemens auch den für die Widerstandsmessung erforderlichen Galvanometern gewidmet. In seinen »Lebenserinnerungen« betont er, daß schon die 1847 von Halske gefertigten Galvanometer »an Empfindlichkeit alle bis dahin bekannten weit übertrafen«. Werner Siemens hat selbst z. B. mit seinem Universal-Galvanometer (Bild 1) und seinem aperiodischen Spiegelgalvanometer wesentliche Beiträge zur

Technik der Galvanometer geleistet, und er hat aufgrund der Arbeiten von WEBER richtungweisend das Torsions-Elektrodynamometer (Bild 2) angegeben. Damit führte er das – wenn auch beschränkt – bewegliche stromführende Organ ein. Als Instrument mit stromführendem beweglichem Organ, dessen Ausschlag eine feste Beziehung zum Meßwert hat, ist daraus 1880 – also gleichzeitig mit dem Drehspulgalvanometer von DEPRez und d'ARSONVAL – bei Siemens & Halske das Spiegel-Elektrodynamometer für schwache Ströme von O. FRÖLICH hervorgegangen.

Im Jahre 1897 hatte die Meßtechnik bei Siemens & Halske bereits eine solche Bedeutung als Arbeitsgebiet erlangt, daß ihr eigens eine Pflegestätte, die Meßinstrumenten-Abteilung, gegeben wurde.

Aus der Neuorganisation der Siemens & Halske AG, die mit einem Rundschreiben vom 18. Juni 1921 eingeleitet wurde, ging u. a. das Wernerwerk M hervor. Es umfaßte zunächst die Meßinstrumentenabteilung, die Wassermesserabteilung und die elektro-medizinische Abteilung, die später Bestandteil der Siemens-Reiniger-Werke AG wurde. Zurückblickend kann man heute feststellen, daß der Zeitpunkt überaus günstig gewählt worden war, fällt er doch zusammen mit einem wichtigen Wendepunkt in der elektrischen Meßtechnik.

Um diese Zeit entwickelten sich in der Elektrizitätsversorgung immer größere und schließlich ganze Länder überdeckende zusammenhängende Netze. Es wurden Großkraftwerke gebaut, und die Netzspannung der Übertragungsleitungen wurde immer höher getrieben. Mit der Technik der Großkraftwerke rückten neue Aufgaben in den Brennpunkt des Interesses der Meßtechniker, wie die Erfassung wärmetechnischer Größen, die selbsttätige Regelung der Kessel, die Messung hoher Spannungen

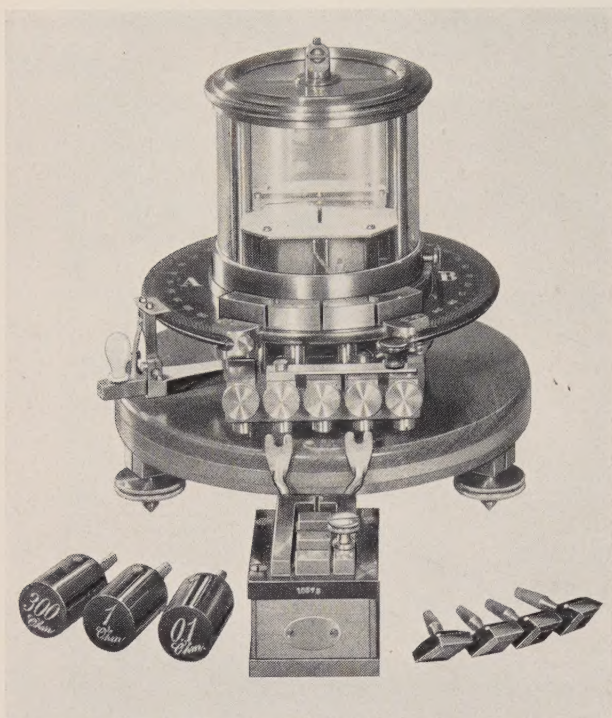


Bild 1 Universal-Galvanometer von Werner Siemens zum Messen von Strom, Spannung und Widerstand (1868)

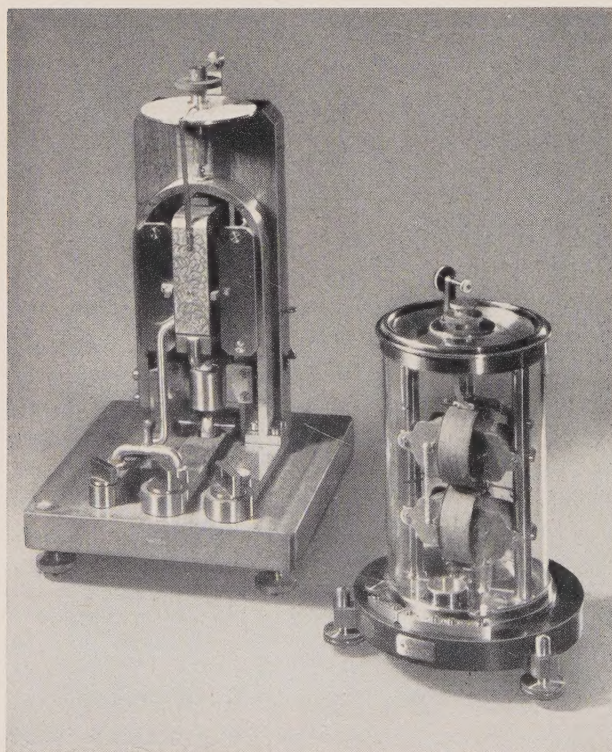


Bild 2 Links: Torsions-Elektrodynamometer für Wechselstrommessung (1883). Rechts: Astatices Torsions-Elektrodynamometer für Wechselspannungsmessung (1887)

mit Hilfe von Wandlern und die zur Beherrschung der Isolation bei Generatoren, Transformatoren und Hochspannungsleitungen erforderlichen Untersuchungen. Zu der Aufgabe, starke Ströme bei hohen Spannungen zu messen, gesellte sich die zwingende Notwendigkeit, Generatoren, Kabel und Transformatoren besser als bisher zu schützen und bei Kurzschlüssen auf der Leitung das defekte Leitungsstück selektiv abzuschalten.

Bereits vor dem ersten Weltkrieg hatte die chemische Industrie begonnen, eine große Anzahl diskontinuierlich verlaufender Prozesse auf kontinuierlichen Verlauf umzustellen. Diese Entwicklung ging in den zwanziger Jahren immer rascher vor sich. Von der Ammoniaksynthese ausgehend, wurden mehr und mehr neuartige und zunehmend komplizierte Anlagen instrumentiert, mit Regelungen ausgestattet und automatisiert. Der Bedarf an flüssigen Brennstoffen und Schmierstoffen wuchs an, und damit ergab sich auch in der Ölindustrie die Aufgabe, Durchflüsse, Drücke, Behälterstände, Temperaturen in immer größerer Anzahl zu messen und genau zu regeln, die Meßwerte zu übertragen und an zentraler Stelle anzuzeigen. Meß- und Regelverfahren, die für Dampfkessel entwickelt worden waren, konnten zwar zum Teil auf die Prozesse der Verfahrensindustrie übertragen werden, für die Großprozesse der Erdölindustrie mußte jedoch eine Sondertechnik entwickelt werden, um extremen Forderungen nach Explosionssicherheit genügen zu können. So entstanden die Verfahren des pneumatischen Messens und Regels, und erst in den letzten Jahren ist es gelungen, die Vorzüge der elektrischen und pneumatischen Hilfsenergie in elektro-pneumatischen Instrumentierungs- und Regelsystemen zu vereinigen.

Schon frühzeitig wurden nach dem Wärmeleitverfahren die ersten selbsttätig arbeitenden Analysegeräte geschaffen, zunächst wieder für das Kesselhaus, dann für die automatisierten Betriebe der chemischen Industrie. Wenn heute die automatische Führung von Prozessen durch übergeordnete Rechner ein immer stärkeres Zusammenwachsen von Meß-, Regelungs- und Analysetechnik hervorbringt, so schließen die letzten 40 Jahre in der Tat einen überaus bemerkenswerten Entwicklungsgang vom Einzelgerät zur Automatisierung von Großanlagen in sich ein.

Die technischen Erfolge, die auf diesem Gebiet in den vergangenen vier Jahrzehnten erreicht werden konnten, sind dadurch besonders eindrucksvoll, daß sie zum Teil in Zeitläufen erarbeitet wurden, die ökonomisch und politisch überaus ungünstige Voraussetzungen boten.

Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen, wenn man den historischen und ökonomischen Tatsachen, dem Auf und Ab dieser vier Jahrzehnte, in einer vollständigen Darstellung folgen wollte. Es seien daher nur einige grundlegende Erfindungen und Entwicklungen aufgezeigt, die vom Wernerwerk für Meßtechnik ihren Aus-

gang genommen und die Technik des Messens und Regels in entscheidende Richtungen gelenkt haben.

Der Meßgerätebau im Wernerwerk für Meßtechnik

Die ursprünglichsten grundlegenden Aufgaben der Meßtechnik bestanden im Messen von Gleichströmen, Gleichspannungen und Widerständen. In den zwanziger Jahren waren diese Aufgaben bereits im wesentlichen gelöst. Galvanometer hoher Empfindlichkeit, Präzisionswiderstände, Kompensatoren und Meßbrücken für höchste Genauigkeitsanforderungen gehörten seit langem zum Lieferprogramm von Siemens & Halske.

Die wichtigste Grundlage für diese Erfolge im Meßgerätebau waren außergewöhnliche Leistungen in der Feinwerktechnik. Um sie zu erzielen, hatte Werner Siemens auch einen außergewöhnlichen, aber überaus wirksamen Weg eingeschlagen. Er hatte sich nämlich dazu entschlossen, zur Verwirklichung seiner eigenen Erfindungen – soweit diese besondere feinmechanische Fähigkeiten erforderten – den jeweils besten Mechaniker aus seinem Werk herauszugreifen, ihn besonders auszuzeichnen und ihm die praktische Ausführung seiner Vorschläge zu übertragen. Der für Werner Siemens persönlich arbeitende Mechaniker wurde »Bestmechaniker« genannt, und dies mit Recht, denn er war ja als bester aller in Betracht kommenden Kräfte berufen worden. Mit dem wachsenden Umfang und der steigenden Anzahl der Entwicklungsaufgaben wurde es später notwendig, den Bau von Versuchsmustern eigens dafür bestimmten Werkstätten zu übertragen, aber auch dann wurde noch Jahrzehnte hindurch dem jeweils besten Könner als »Bestmechaniker« eine Sonderstellung eingeräumt. In eigener Werkstatt konnte er sich selbstgewählten Aufgaben hingeben.

Der letzte, der dieses Amt noch ausfüllen konnte, war der Mechanikermeister FRANZ DÜRR. Er krönte nicht nur seine eigene Tätigkeit, sondern die der Bestmechaniker überhaupt durch eine bemerkenswerte Erfindung, die die Technik der Galvanometer und Präzisionsinstrumente in eine neue Richtung gelenkt hat. FRANZ DÜRR erfand im Jahre 1925 das Lichtmarken-Galvanometer [1]. Vorher waren Galvanometer hoher Empfindlichkeit immer mit einer getrennten Ableseeinrichtung versehen gewesen, auf die das Galvanometer eingerichtet werden mußte. Die wesentliche Neuerung, die DÜRR eingeführt hat (Bild 3), bestand darin, daß Galvanometer und Ablesevorrichtung in einem tragbaren Gehäuse konstruktiv vereinigt wurden. So entstand ein leicht zu handhabendes empfindliches Instrument mit hoher Genauigkeit und gleichbleibender Eichung.

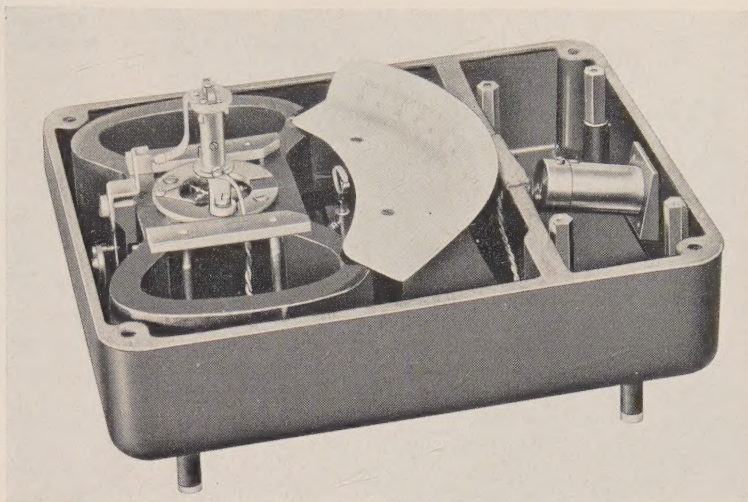


Bild 3 Erstes Laboratoriumsmuster des Lichtmarken-Galvanometers mit hohlkegelförmiger Skala und Spannbandaufhängung des beweglichen Organs (nach F. DÜRR)

Diese Vereinigung der Spannbandlagerung mit einer Lichtmarkenablesung hat sich in den vergangenen vier Jahrzehnten mehr und mehr durchgesetzt. Heute werden sowohl Drehspulinstrumente als auch Präzisions-Leistungsmesser (Bild 4) der genauesten Klasse nicht nur im Hause Siemens mit Lichtmarkenablesung und Spannbandlagerung ausgeführt.

DÜRR bevorzugte bei seinen Konstruktionen die Spannbandlagerung anstatt der damals bei Galvanometern üblichen Lagerung an Tragbändern und der für Präzisions- und Schalttafelinstrumente ausschließlich verwendeten Spitzenlagerung. Dies hat sich schon

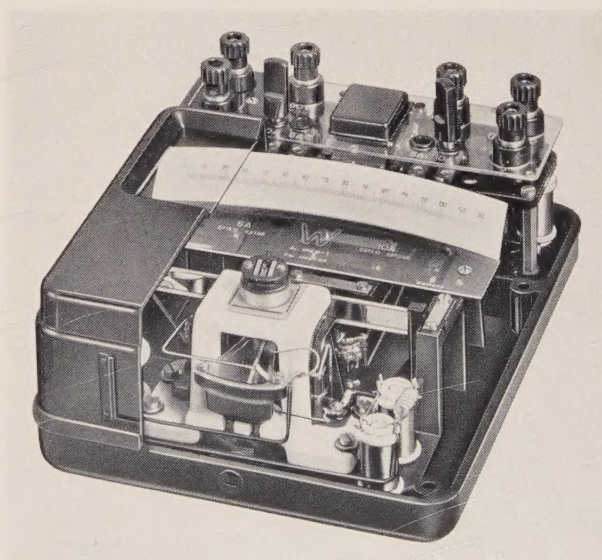


Bild 4 Schnittmodell eines astatischen Präzisions-Leistungsmessers heutiger Fertigung

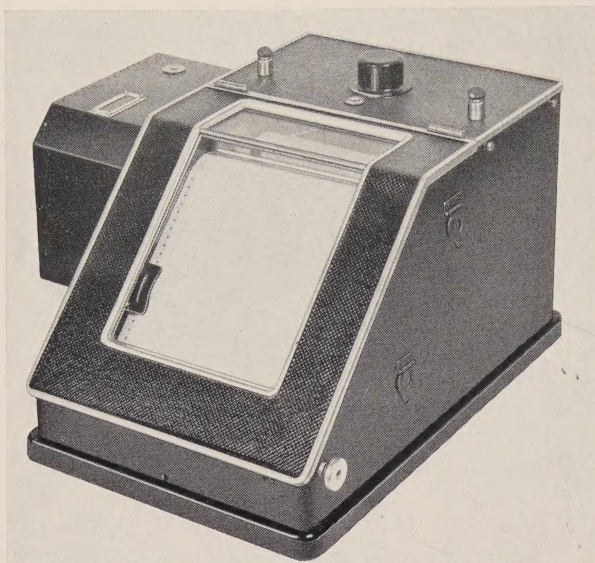


Bild 5 Punktschreiber in Pultform mit Drehspul-Spannbandmeßwerk (ab 1915)

früh in bemerkenswerter Weise ausgewirkt. So waren die für das wärmetechnische Meßwesen wichtigen Punktschreiber (Bild 5) bei Siemens & Halske von jeher mit Spannbandmeßwerken ausgestattet. Im letzten Jahrzehnt gelang es schließlich – ein unbestreitbarer Erfolg –, eine Lagerung mit kurzen Spannbandern zu schaffen, ebenso geeignet für horizontale wie für vertikale Achslage, mechanisch robust auch für recht geringe Drehmomente ausführbar, so daß es nunmehr möglich

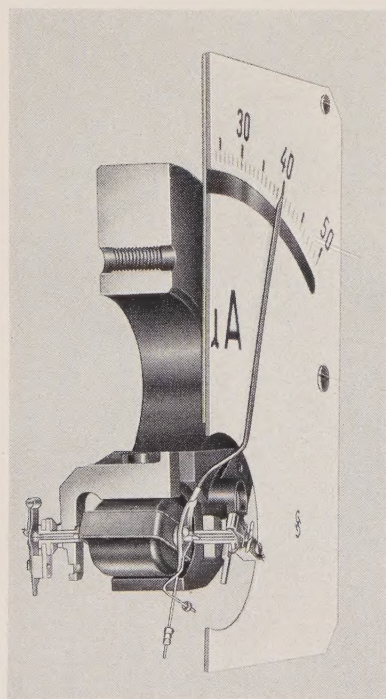


Bild 6 Teilschnitt durch das Meßwerk eines Drehspul-Schalttafel-instruments mit Spannbandlagerung (Baujahr 1952)

wurde, auch Schalttafel- und Betriebsmeßgeräte in Spannbändern zu lagern [2].

Während man früher mit Rücksicht auf die elastische Nachwirkung gezwungen war, eine Spannbandlänge von 30 mm nicht zu unterschreiten, erbrachte eine sorgfältige Entwicklung in den Jahren 1946 bis 1952 eine Spannbandlagerung (Bild 6), die eine Spannbandlänge von nur 7,5 mm benötigt und die sich praktisch als unzerstörbar gegenüber Beanspruchungen durch Stoß und Fall erwiesen hat. Durch günstige Entlastung der Spannbander und sorgfältige Auswahl der Werkstoffe gelang es, die elastische Nachwirkung in sehr geringen Grenzen zu halten und – da die Spannbandlagerung im Gegensatz zur Spitzenlagerung frei von Reibungsfehlern ist – unter sonst gleichen Verhältnissen den Leistungsverbrauch bei Drehspul-Betriebsmeßgeräten auf den hundertsten Teil zu senken. Bei Dreheiseninstrumenten ließ er sich so weit senken, daß ein Vielfachinstrument mit Dreheisenmeßwerk, das AV_{eff} -MULTIZET*, gebaut werden konnte, das im Gegensatz zu den bisher üblichen Gleichrichtermeßgeräten eine grundsätzlich fehlerfreie Messung des Effektivwertes von Wechselströmen ermöglicht.

Wechselstrom-Meßtechnik

Bei aller Würdigung der in der Gleichstrom-Meßtechnik noch erzielten Erfolge muß man das erste Jahrzehnt der letzten 40 Jahre doch als die Blütezeit der Wechselstrom-Meßtechnik bezeichnen. Als zweckmäßiges Mittel zur Übertragung großer elektrischer Leistungen über weite Strecken hatte sich die Wechselspannung durchgesetzt, und mit ihr kamen neue Meßaufgaben und neue Meßprobleme. Auf dem Gebiet des Meßgerätebaues waren nun Meßwerke zu entwickeln, die es ermöglichten, die charakteristischen Wechselstromgrößen Frequenz, Wirkleistung, Blindleistung, Phasenverschiebung, Leistungsfaktor, Verlustwinkel, Kurvenform, kapazitive und induktive Blindwiderstände sowie Scheinwiderstände zu messen. Die hohen Übertragungsspannungen und großen Stromstärken verlangten von der Meßtechnik die Entwicklung von Strom- und Spannungswandlern besonderer Bauart. Um Generatoren, Transformatoren und die Übertragungsleitungen wirkungsvoll vor den Folgen von Kurzschlüssen und Erdschlüssen zu schützen, mußten die verschiedenen Arten des Selektivschutzes erfunden und entwickelt werden. Im folgenden soll gezeigt werden, daß wichtige Erfindungen, die heute Allgemeingut der Technik sind, in den zwanziger Jahren ihren Ausgang aus dem Wernerwerk M genommen haben.

Zunächst zu den Wechselstrom-Betriebsmeßgeräten. Im Wernerwerk M entstanden Anfang der zwanziger Jahre eisengeschlossene elektrodynamische Meßgeräte (Bild 7), die Robustheit, Genauigkeit, geringe Beeinflussung durch Fremdfelder und hohe Einstellkräfte aufwiesen [3, 4, 5].

* Eingetragenes Warenzeichen

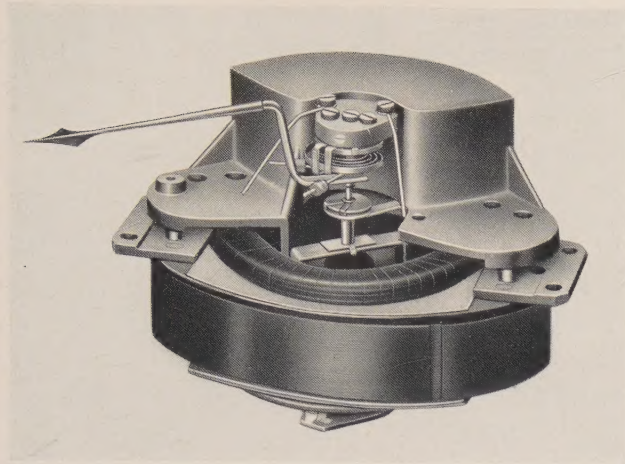


Bild 7 Eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk für Schalttafelinstrumente (um 1920)

Viele neue Grundgedanken und gründliche wissenschaftliche Untersuchungen zum Bau und zur Verwendung der Wechselstrom-Betriebsmeßgeräte stammen von H. KAFKA [6, 7, 8].

Im gleichen Jahr veröffentlichte H. ZÖLLICH seine grundlegenden Untersuchungen über das dynamische Verhalten von Meßwerken [9, 10]. Diese haben sich auch maßgebend ausgewirkt bei der Entwicklung der Schwin- ger für den Siemens-Universal-Oszillographen. Das im Jahre 1930 erschienene Gerät stellte für fast zwei Jahr- zehnte die höchste Entwicklungsstufe der Technik der Lichtstrahl-Oszillographie dar. Es hat die führende Stel- lung des Wernerwerkes M auf diesem Gebiet begründet, die in den letzten Jahren ihren Ausdruck in Geräten wie dem OSCILLOGRANT*, OSCILLOMAT* und OSCILLOFIL* gefunden hat.

Besondere Probleme in der Bewältigung hoher Span- nungen und großer Stromstärken stellte der Wandlerbau. Eine bloße Übertragung der Bauprinzipien der Lei- stungstransformatoren auf den Bau von Meßwandlern hätte zu Lösungen geführt, die hochspannungstechnisch und meßtechnisch ungünstig, preislich außerdem untrag- bar gewesen wären. Die konstruktive Aufgabe in der Schaffung von Leistungstransformatoren bestand von jeher darin, gute Wirkungsgrade zu erzielen und die Ver- lustwärme günstig abzuführen. Bei den Meßwandlern stehen dagegen ganz andere Gesichtspunkte im Vorder- grund: Bewältigung der Hochspannungsfestigkeit bei kleinen Abmessungen und Wahrung der Meßgenauig- keit.

Auf dem Gebiet des Meßwandlerbaues sind im Werner- werk M Pionierleistungen zu verzeichnen. Diese haben in dem schöpferischen Jahrzehnt 1920 bis 1930 zu grund-

legenden Neuerungen geführt, von denen sich ein Teil erst heute auszuwirken beginnt. Bereits im Jahre 1920 begann KARL SCHRADER, die Spannung von Hochspan- nungswicklungen mit Metallbelägen zu steuern [11, 12]. Besonders bemerkenswert ist es, daß SCHRADER schon 1922 dazu überging, die ringförmige Primärwicklung von Meßwandlern mit Metallschalen zu umhüllen, ein Gedanke, der zum Vermeiden von Glimmerscheinungen erst im letzten Jahrzehnt erfolgreich wieder aufgegriffen wurde. Die den meß- und hochspannungstechnischen Bedürfnissen am glücklichsten entsprechende Lösung des Stromwandlers für hohe Betriebsspannungen wurden im Kreuzring-Topfwandler und bald darauf im Kreuz- ring-Stützwandler (Bild 8) verwirklicht [13, 14]. Da- gegen konnte erst im folgenden Jahrzehnt die wesent- lich schwierigere Aufgabe gelöst werden, einen sicheren Wandler für Höchstspannungen zu bauen: den Stützer- Spannungswandler [15, 16, 17, 18]. Auch die in den letzten Jahren eingeführten neuen kapazitiven Wandler gehen in ihren Anfängen bis in die zwanziger Jahre zurück. So wurde bereits im Jahre 1924 vorgeschlagen, einen kombinierten Strom-Spannungs-Wandler zu bauen, bei dem die Strommessung über einen induk- tiven Wandler, die Spannungsmessung aber mit kapazi- tiven Widerständen durchgeführt wird [19].

Mit großer Zähigkeit wurde bereits seit 1922 daran ge- arbeitet, die Kondensatordurchführung zu einem kapa- zitiven Spannungswandler auszubilden [20, 21]. Die da- maligen Versuche, einen kapazitiven Spannungswandler zu schaffen, konnten noch nicht zum Erfolg führen, weil

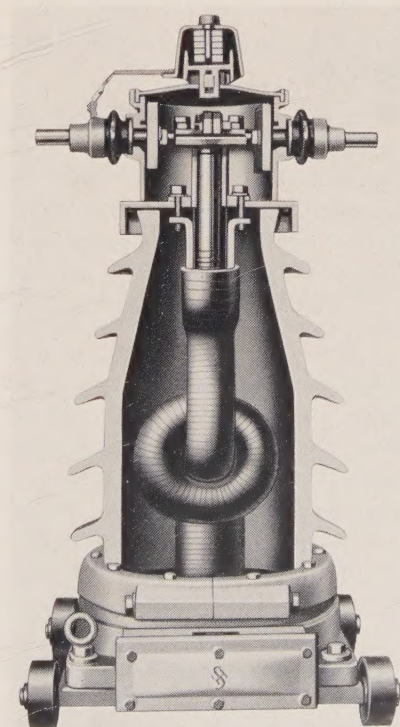


Bild 8 Schnitt durch einen 60-kV-Kreuzring-Stützer-Stromwandler (Baujahr 1930)

* Eingetragenes Warenzeichen

der Herstellung technischer Vakua noch enge Grenzen gesetzt waren, weil keine geeigneten Werkstoffe zur Verfügung standen und weil Mittel zur Verstärkung der Ladeströme noch völlig fehlten. Was den kombinierten Strom-Spannungs-Wandler betrifft, glaubt der Verfasser, die wirtschaftlichste Lösung in der Vereinigung eines induktiven Stromwandlers mit einem kapazitiven Spannungswandler zu sehen. Dabei wird die Möglichkeit, Wechselströme betriebssicher durch Transistoren zu verstärken, bedeutungsvoll werden.

Fernmessung und Selektivschutz-Technik

Als unentbehrliche Hilfsmittel für die Verteilung der elektrischen Energie in großen Netzen entwickelten sich seit 1920 die Verfahren der Schutztechnik und der Fernmessung. Aufgabe der Schutzrelais ist es, bei Kurzschlüssen in Hochspannungsanlagen diejenigen Schalter zu öffnen, die der Fehlerquelle am nächsten liegen. Solange es sich um unvermaschte Netze mit Stickleitungen handelte, konnte diese Aufgabe mit Überstrom-Zeit-Relais [22] gelöst werden. Die Auslösezeiten wurden dabei vom Ende der Leitung in Richtung auf das Kraftwerk zunehmend gestaffelt.

Die Ausbildung von Ringleitungen machte darüber hinaus zunächst noch Richtungsrelais erforderlich, die, als Wattmeter wirkend, die Richtung des Energieflusses ermittelten. Mit der weiteren Vergrößerung der Netze wurden die Abschaltzeiten des Überstrom-Zeit-Schutzes zu lang; die Lösung brachte das Distanzschutzprinzip, bei dem sich die Zeitstaffelung vom Fehlerort aus aufbaut. Wesentliche Beiträge zu dieser Technik hat M. SCHLEICHER geliefert, dessen im Jahr 1936 herausgegebenes Buch [23] den Stand der damaligen Selektivschutz-Technik umfassend darstellt.

Eine beträchtliche Verbesserung des Leitungsschutzes brachte im letzten Jahrzehnt die Einführung von Gleichrichtern und Drehspulrelais anstelle der verhältnismäßig langsamen Wechselstrommeßwerke und Ferraris-Triebkerne. In der Konzeption dieses erfolgreichen Schutzsystems kommen H. NEUGEBAUER wohl die größten Verdienste zu, der diese Technik umfassend dargestellt hat [24, 25].

Auch die Fernmeßtechnik beginnt mit dem Anfang der Berichtszeit. Bereits 1919 hatte OSKAR VON MILLER die deutsche Elektroindustrie aufgefordert, Einrichtungen für eine Zentralkommandostelle der bayrischen Elektrizitätsversorgung in Karlsfeld zu schaffen. Es war zunächst nicht leicht, ein geeignetes Übertragungsverfahren zu finden. Ende der zwanziger Jahre war aber schließlich im Impulsfrequenz-Verfahren ein Verfahren gefunden, das dem damaligen Bedarf an Kanälen und den gegebenen Entfernungen entsprach. Das Impulsfrequenz-Verfahren wird auch heute noch für die Übertragung elektrischer Größen am meisten verwendet. Das

Grundprinzip wurde bereits 1857 von Werner Siemens in Poggendorfs Annalen veröffentlicht, und zwar als Verfahren zur Messung von Kapazitäten. Zwischen 1930 und 1940 sind von der Impulsfrequenz-Fernmessung überaus wertvolle Anregungen ausgegangen, die sich später besonders in der Regelungstechnik als fruchtbar erwiesen haben. So war es die Impulsfrequenz-Fernmessung, die als erster Zweig der Meßtechnik Röhrenschaltungen im Dauerbetrieb verwendete. Es wurden auch neuartige Gleichstromverstärker entwickelt [26, 27]. Diese Grundschaltungen werden heute weit über die Meßtechnik hinaus angewendet, zumal sie es ermöglichen, Gleichströme zu addieren. Das gilt für die Stromkompensationsschaltung (Saugschaltung), die heute die wichtigste Grundlage für die Technik der Analogrechner ist, und auch für den Gedanken, den Verstärkern eingepreßte Ströme zu entnehmen, der zuerst in der Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker entwickelt worden ist. Er wird heute mit großem Erfolg in den Rechenschaltungen der Regelungstechnik benutzt. Auch das Prinzip der Drehmomentkompensation [28] wurde zuerst für die Fernmessung entwickelt und hat von hier aus den Weg in die Regelungstechnik gefunden [29].

Heute arbeiten Fernmeßgeber mit Transistoren [30], und an die Seite des Impulsfrequenz-Verfahrens sind neue Verfahren getreten, die sich ebenso durch hohe Sicherheit in der Zeichenübertragung auszeichnen wie durch geringe Anforderungen an die Anzahl der zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle. Es sind dies die Zeitmultiplex-Verfahren [31] und – die fortschrittlichste Entwicklung auf diesem Gebiet – das Puls-Code-Verfahren [32]. Zu der Fernmessung elektrischer Leistungsgrößen ist die Messung wärmetechnischer Größen getreten, die heute die zentrale Steuerung großer Versorgungsnetze für Gas, Wasser und Rohöl ermöglicht [33, 34].

So sind im Wernerwerk für Meßtechnik im letzten Jahrzehnt für die Fernmessung ebenso grundlegende Pionierarbeiten geleistet worden wie Ende der zwanziger Jahre bei der Einführung der Impulsfrequenz-Fernmessung für elektrische Größen [35].

Die Entwicklung der wärmetechnischen Meß- und Regelungstechnik im Wernerwerk für Meßtechnik

Als wichtigste Triebfeder für das stetige Wachstum der elektrischen Meßtechnik in der Berichtszeit wurde eingangs der Übergang zu einer großräumigen Energiewirtschaft genannt. Dieser war auch eine der beiden Ursachen der Entwicklung und des Auftriebes des wärmetechnischen Messens und Regels. Die zweite Ursache ist die Automatisierung von Großprozessen in der Verfahrenindustrie. In den eng vermaschten, große Räume versorgenden Anlagen waren die Kraftwerk- und Kessel-einheiten immer größer geworden. Die Regelung der Feuerung, das Einhalten von Druck und Temperatur mußte einer selbsttätig wirkenden Kesselregelung über-

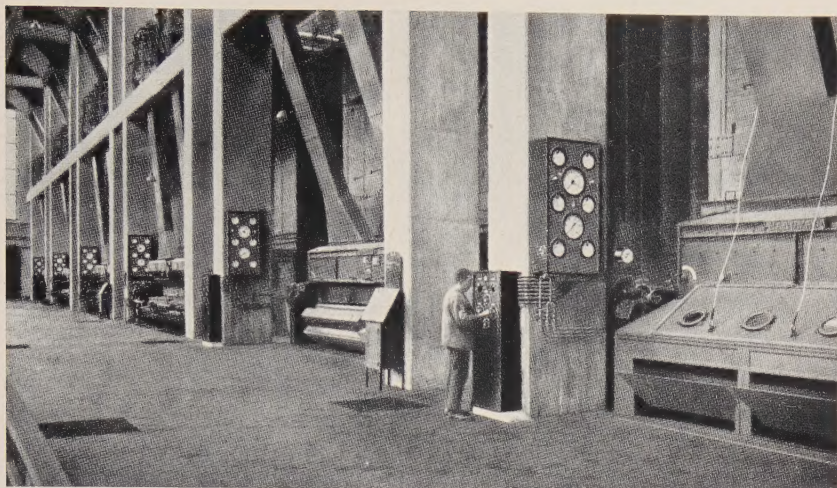


Bild 9 Erstes veröffentlichtes Anlagenbild mit Geräten der Siemens-Kesselregelung: Kraftwerk Neuhoof der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG (1928).
Vorn: Zwei der vier ersten ausgerüsteten Kessel

tragen werden. In ähnlicher Weise verlangte der auf kontinuierlichen Materialfluß umgestellte industrielle Großprozeß eine genaue Erfassung und Regelung des Zuflusses der zu mischenden Stoffe und eine Konstanthaltung jener physikalischen Größen, die die Reaktionen nach Geschwindigkeit und Ausbeute bestimmen. Nennt man das Jahrzehnt zwischen 1920 und 1930 die Pionierzeit der Wechselstromtechnik, so kann man die folgenden

den. Der in diesen Anlagen enthaltene elektrische Regler war das »Brückenrelais« (Bild 10), aus dem dann der bekannte elektrische Kompensationsregler (Bild 11) hervorgegangen ist.

Voraussetzung für die Regelung war, daß die wichtigsten Betriebsvariablen meßtechnisch erfaßt werden konnten. Diese sind: Temperatur, Druck, Durchfluß, Behälterstand. Um die Regelung mit elektrischen Mitteln durchführen zu können, mußte man dann diese Meßgrößen in proportionale elektrische Spannungen, Ströme oder Widerstände überführen.

Während die Temperatur bereits damals leicht unmittelbar elektrisch gemessen werden konnte, war es nicht möglich, für die Größen Druck, Durchfluß und Behälterstand zuverlässige, unmittelbar wirkende elektrische Fühler zu bauen. Es blieb nichts anderes übrig, als diese Größen mit mechanischen Meßgeräten zu erfassen und deren Zeigerstellungen ins Elektrische zu übertragen. Bereits in den zwanziger Jahren wurde es als wichtig erkannt, bei einer solchen Vorrichtung offene Kontakte zu vermeiden, weil diese für Verschmutzung oder Korrosion anfällig waren. Die Erfindung, die »die Fernanzeige der Winkelstellung eines Maschinenteiles oder eines Zeigers« ermöglicht und dabei zugleich offene Kontakte vermeidet, stammt aus dem Hause Siemens und geht auf F. NAHM zurück. Der als »Ringrohr« (Bild 12) bezeichnete Bauteil ist viele Jahre das einzige Mittel geblieben, mit dem eine Winkelstellung bei geringer mechanischer Rückwirkung in eine elektrische Widerstandsänderung übertragen werden konnte [39]. Auch die induktiven Anordnungen zur kontaktlosen Übertragung von Wegen und Winkelstellungen in elektrische Wechselstromgrößen [40, 41] haben vom Wernerwerk M ihren Ausgang genommen.

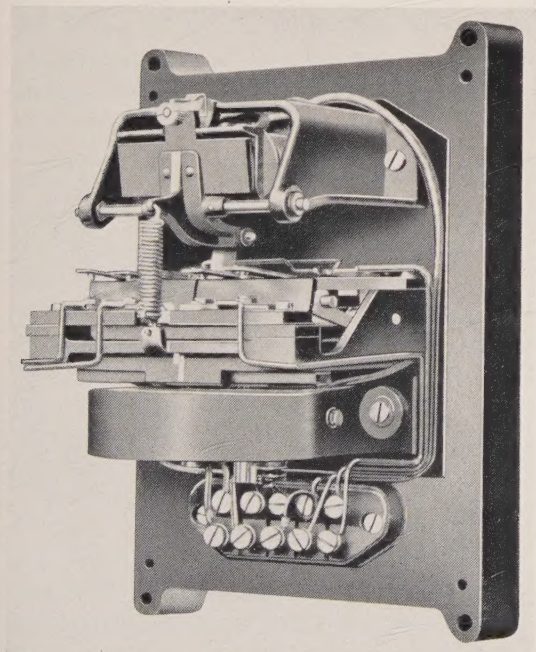


Bild 10 Brückenrelais für die Regelung von Brennstoff- und Luftmenge. Bild aus der ersten Veröffentlichung über Kesselregelung, SH 3000 (1929)

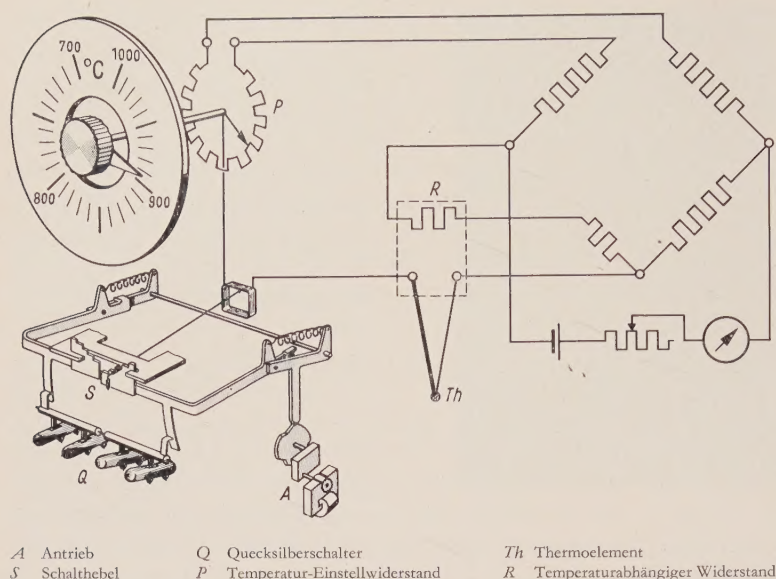


Bild 11 Kompensationsregler, Wirkungsschema. Bild aus einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1935

Inzwischen ist die induktive Übertragung zum technischen Allgemeingut des wärmetechnischen Messens und Regels geworden. Der wesentlichste Fortschritt blieb indessen den letzten Jahren des Berichtszeitraums vorbehalten, in denen es mit dem TELEPERM*-Abgriff gelang, Zeigerstellungen praktisch rückwirkungsfrei und völlig kontaktlos in eingepreßte Gleichströme umzuformen [42].

Es ist nicht möglich, alle Anregungen und Impulse hier aufzuzählen, die die industrielle Regelungstechnik vom Wernerwerk für Meßtechnik erfahren hat. Nur die wichtigsten seien erwähnt.

Bereits 1934 wurden die ersten elektronischen Röhrenregler im Wernerwerk M ausgeführt. Trotz unbestreitbarer Vorzüge der elektronischen Steuerungen verhinderte jedoch die verhältnismäßig größere Ausfallwahrscheinlichkeit der Elektronenröhren und Stromtore eine allgemeine Einführung des elektronischen Reglers [43]. Auch für den Einsatz des Magnetikverstärkers zur

Messung wärmetechnischer Größen sind im Wernerwerk M Mitte der dreißiger Jahre grundlegende Arbeiten geleistet worden, die heute noch die zentrale Stellung des Magnetverstärkers in der Temperaturmeßtechnik bestimmen [44].

Der erste elektrische Regler für die Wärme- und Verfahrenstechnik, der den betriebssicheren Magnetikverstärker als bestimmendes Glied enthielt, war der stetig arbeitende Magnetikregler [45]. Ihm folgte rasch das TELEPERM-System für alle Zwecke der Wärme- und Verfahrenstechnik.

Die Entwicklung zur gegenwärtigen Regelungstechnik würde unvollständig beschrieben sein, wenn nicht auch der pneumatische Regler erwähnt wäre. Die Technik der pneumatischen Regelung ist im Wernerwerk M erstmals 1935 aufgegriffen worden. Sie stand im engen Zusammenhang mit dem Entstehen einer deutschen Erdölindustrie (Bild 13). Mit den Mitteln der Pneumatik ließ sich die Forderung nach unbedingter Explosionssicherheit am leichtesten erfüllen. Es ist in Deutschland nicht leicht gewesen, einen bereits bestehenden, nach dem Krieg noch vergrößerten Vorsprung der amerikanischen Technik aufzuholen. Im TELEPNEU*-System ist der pneumatische Regler nicht nur ein ebenbürtiger Partner des elektronisch arbeitenden TELEPERM-Reglers geworden, sondern der grundlegende Unterschied, nämlich die Frage der Hilfsenergie, ist mehr oder weniger zu einer Entscheidung über die zweckmäßige Aufteilung eines zu einer Einheit zusammengewachsenen Systems geworden.

Elektrische Messung nichtelektrischer Größen

In der Temperaturmessung hat sich das Wernerwerk M durch die Entwicklung der Gesamtstrahlungs-Pyrometer (ARDOMETER*) besondere Verdienste erworben [46]. Als temperaturempfindlicher Teil diente ursprünglich ein Thermoelement im Glasgefäß. Unter Beibehaltung des Grundgedankens sind heute die ARDOMETER teils mit frei in der Luft stehenden Vielfachthermoelementen, teils mit Fotodioden ausgerüstet. Die Temperaturmeßbereiche dieser Gesamtstrahlungs-Pyrometer erstrecken sich heute von -40 bis $+2000$ °C [47].

Für die Druck-, Stand- und Durchflußmessungen sind das Kolbenmanometer und das Quecksilber-Schwimmermanometer im Zusammenhang mit der Kesselregelung bereits in den zwanziger Jahren entstanden. Auch heute noch sind diese Geräte an Genauigkeit und Zuverlässig-

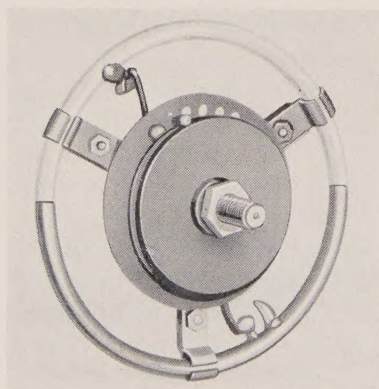


Bild 12 Ringrohrwiderstand

* Eingetragenes Warenzeichen

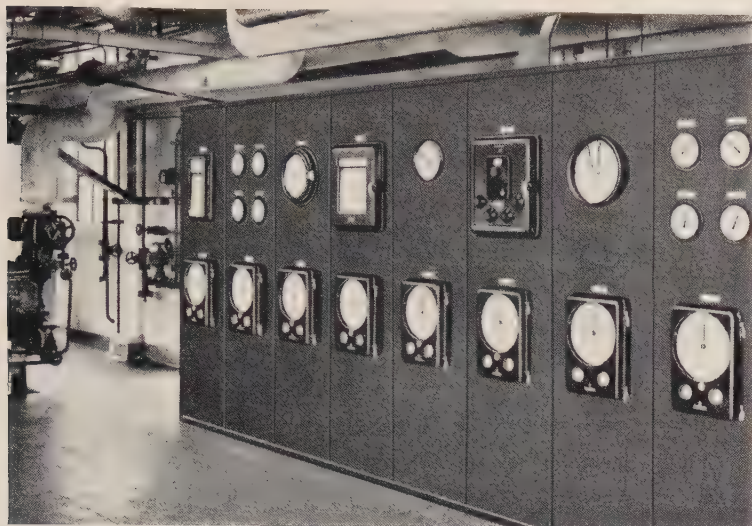


Bild 13 Pneumatische Regelanlage in der Raffinerie Misburg der NERAG (1935)

keit unübertroffen. Die Radizierung des Wirkdruckes bei Quecksilber-Schwimmermanometern mit Hilfe zylindrischer Gefäße und einer magnetisch gekuppelten radizierenden Kurvenscheibe erwies sich als bahnbrechend [48]. Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes überschreiten, wenn der Verfasser versuchen wollte, auch die Impulse aufzuzählen, die auf dem Gebiet der Feuchtemessung, der Wärmezählung, der elektrolytischen Leitfähigkeitsmessung, der Salzgehaltmessung, der pH-Messung, der Rauchdichtemessung und auf vielen anderen Gebieten vom Wernerwerk M ausgegangen sind. Es soll nur auf den Beitrag für die Entwicklung des Wirkdruckverfahrens zum Messen von Durchflüssen und auf die grundlegenden Arbeiten in der Entwicklung des Wärmeleitverfahrens zur Gasanalyse eingegangen werden.

Um große Durchflüsse von Wasser, Gas oder Dampf zu erfassen, verwendet man Strömungsmesser nach dem Wirkdruckverfahren. Die meisten Meß- und Regelstrecken in der Verfahrenindustrie sind Durchflußstrecken. Deshalb kommt den auf diesem Gebiet durch Forschung und Entwicklung geleisteten Arbeiten eine besondere Bedeutung zu. Die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten waren zwar seit VENTURI (18. Jahrhundert) bekannt. Zur genauen meßtechnischen Erfassung gehört aber außerdem die Ermittlung von Beiwerten, die ursprünglich für jedes Venturirohr, für jede Düse oder Blende getrennt bestimmt werden mußten. Es lag deshalb nahe, diese Beiwerte ein für allemal für die verschiedenen Ausführungen zu bestimmen; sie liegen heute im Normblatt DIN 1952 vor. Für diese Grundlagen wurde im Wernerwerk M eine Arbeit von bleibendem Wert geleistet. Der bekannte Uhrenturm in Berlin-Siemensstadt birgt den Hochbehälter für eine große Wassermesser-Prüfstation. Er liegt unterhalb der

Uhr in 50 m Höhe und hat einen Inhalt von etwa 400 m³. Der Behälter war für die Versuche geeicht, und der Wasserstand konnte nach unten übertragen werden. Die Prüfstation – damals die größte Europas – erfüllte die hohen meßtechnischen Forderungen, die für die Aufstellung von Normen gestellt werden mußten. Ein großer Teil der Versuche wurde in vorbildlicher Zusammenarbeit zwischen R. WITTE (BASF) und G. RUPPEL (Siemens & Halske) durchgeführt.

Zur technischen Gasanalyse durch Messung der Wärmeleitfähigkeit ist eine Anordnung, bei der in Brücke geschaltete, geheizte temperaturabhängige Widerstände zum Teil dem Meßgas ausgesetzt, zum Teil unter Normalbedingungen gehalten werden, zum ersten Mal von MAX MÖLLER benutzt worden [49].

Das aus dieser Entwicklung entstandene Gerät gehört als »Wärmeleitkammer« heute zum allgemeinen Stand der Technik. Die Wärmeleitkammer wird benutzt zum Prüfen von Rauchgasen (Bild 14), zum Bestimmen von Wasserstoff und Helium und als Meßelement in der Gas-Chromatographie. Auch beim Hitzdraht-Anemometer und bei bestimmten Ausführungen des Ultrarot-Analysegerätes macht man von dem elektrotechnischen Grundgedanken der Hitzdrahtbrücke Gebrauch.

Ein weiterer wichtiger Beitrag aus dem Wernerwerk M auf dem Gebiet der technischen Gasanalyse ist der von

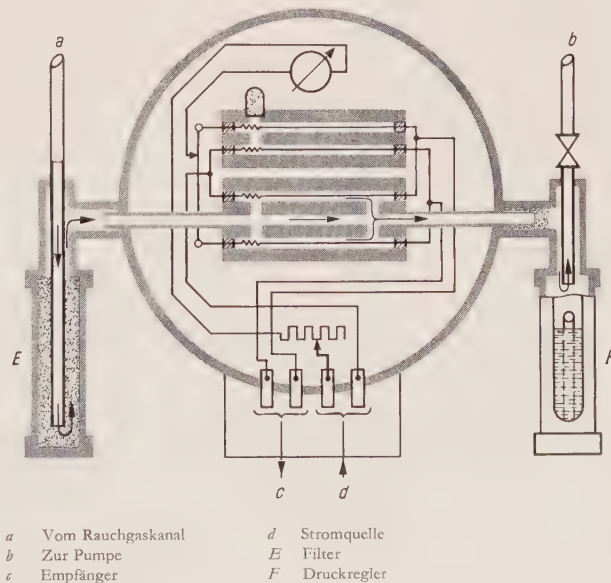
Bild 14 Schnitt durch den CO₂-Geber mit Wärmeleitfähigkeitskammer und Brückenschaltung.

Bild aus einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1925

H. SCHMICK. Er erfand die Infrarotanalyse nach dem negativen Prinzip und machte den heute so weittragenden Vorschlag, die Sensibilisierung mit der Meßkomponente selbst vorzunehmen [50].

Für die Automatisierung von Prozessen in der Chemie kommt der Gasanalyse im allgemeinen und diesen Erfindungen im besonderen eine grundlegende Bedeutung zu. Dasselbe gilt für die Kraftmessung als Ausgang der Automatisierung von Wägevorgängen. Die Entwicklung der magnetoelastischen Kraftmeßdose wurde bereits im Jahr 1931 aufgenommen, und schon 1936 wurde es erstmals möglich, für Kraft- und Drehmomentmessungen stationär arbeitende Meßdosen zu liefern, die einen Kraftbereich von 0,1 bis 1000 kp umfassen [51].

Elektronische Meßgeräte

Es ist bekannt, daß sich das Wernerwerk für Meßtechnik besondere Verdienste bei der Wiederaufnahme der Entwicklungsarbeiten für das Elektronenmikroskop nach 1945 erworben hat. In dieser Zeit entstand das ELMISKOP* I, ein Gerät, das an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit Weltgeltung hat [52].

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Röntgenspektroanalyse haben schon frühzeitig ein für die Gebiete der Atomtheorie wichtiges Ergebnis erzielt. Im Jahr 1925 gelang im physikalischen Laboratorium des Wernerwerkes M die röntgenspektroskopische Entdeckung des Elementes Rhenium durch O. BERG, W. NODDACK und I. TACKE [53].

Das aus diesen Arbeiten hervorgegangene Gerät KRISTALLOFLEX* IV und die mit ihm verbundenen Röntgen-Goniometer und Strahlungsmeßgeräte stellen heute eine Spitzenleistung dar, und die Röntgenanalyseverfahren, die 1925 mit einem so schönen Erfolg begannen, sind heute ein wichtiges Arbeitsgebiet der technischen Röntgenkunde [54, 55].

* Eingetragenes Warenzeichen

Schrifttum

- [1] DRP 428 554 v. 13. 1. 1925 (Klasse 42d): Vorrichtung zur objektiven Spiegelablesung
- [2] Weingärtner, F.: Über die Spannbandlagerung bei elektrischen Betriebsinstrumenten. Siemens-Zeitschrift 27 (1953) 129 bis 134
- [3] Schwenn, R.: Die Leistungsmesser für Wechselstrom. Siemens-Zeitschrift 2 (1922) 494 bis 512
- [4] Keinath, G.: Meßinstrumente für hohe Stromstärken. Siemens-Zeitschrift 4 (1924) 362 bis 363
- [5] Keinath, G.: Ein neuer Registrierapparat zum gleichzeitigen Aufschreiben von Wirk- und Blindleistung. Siemens-Zeitschrift 7 (1927) 229 bis 233
- [6] Kafka, H.: Wechselstrombrücke für Temperaturmessungen an elektrischen Maschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 2 (1922) 365 bis 372
- [7] Kafka, H.: Verwendung des Doppelinstrumentes in Brückenschaltung. DRP 401 975. Elektrotechn. u. Masch.-Bau 42 (1924) 1 bis 5
- [8] Kafka, H.: Untersuchungen über die Gleichgewichtslagen von elektrischen Meßinstrumenten. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 3 (1923-1924) 144 bis 158
- [9] Zöllich, H.: Mechanische Resonanz-Schwingungen in der Meßtechnik. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 2 (1922) 378 bis 400
- [10] Zöllich, H.: Prüfung von Meßgeräten zur Aufzeichnung sich rasch verändernder Größen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 1 (1920-1922) 24 bis 63
- [11] DRP 394 552 v. 4. 12. 1920: Isolation für Hochspannung führende ringförmige Wicklungen von Transformatoren und Meßwandlern (Erfinder: K. Schrader)
- [12] DRP 380 192 v. 30. 3. 1922: Stromwandler für Hochspannung (Erfinder: K. Schrader)
- [13] DRP 413 254 v. 30. 8. 1923: Stromwandler für Hochspannung (Erfinder: vermutlich K. Schrader)
- [14] DRP 597 871 v. 5. 5. 1928: Isolationsanordnung an Hochspannungstransformatoren, vorzugsweise Kreuzringwandlern (Stützerstromwandler)
- [15] DRP 618 497 v. 13. 11. 1930: Höchstspannungstransformator
- [16] DRP 622 878 v. 6. 5. 1931: Wicklungsanordnung für Hochspannungstransformatoren (Erfinder: H. Ritz u. F. Polin)
- [17] DRP 702 477 v. 22. 7. 1937: Stützerwandler (Erfinder: H. Ritz und F. Polin)
- [18] DRP 758 238 v. 27. 11. 1937: Hochspannungstransformator in Stützerform (Erfinder: H. Ritz)
- [19] DRP 419 823 v. 3. 6. 1924: Stromwandler mit eingebauter C-Meßklemme (Erfinder: G. Keinath)
- [20] Keinath, G.: Die Verwendung von Kondensator-Durchführungen zu Meßzwecken. Siemens-Zeitschrift 2 (1922) 606 bis 614
- [21] Keinath, G.: Die Verwendung von Kondensator-Durchführungen zu Meßzwecken («C-Messung»). Siemens-Zeitschrift 6 (1926) 496 bis 502 und 545 bis 549
- [22] Skirl, W.: Die Überstrom-Zeitrelais der Siemens & Halske AG. Siemens-Zeitschrift 1 (1921) 269 bis 274, (bes. Bild 5 auf S. 272) u. S. 308 bis 312
- [23] Schleicher, M.: Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerortung in Hochspannungsanlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1936
- [24] Neugebauer, H.: Selektivschutz. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1955
- [25] Neugebauer, H.: Meßtechnische Grundlagen der Widerstandsmessung beim neuen Siemens-Leitungsschutz. Siemens-Zeitschrift 25 (1951) 244 bis 251
- [26] Merz, L.: Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker mit direkt wirkender mechanischer Steuerung. Arch. Elektrotechn. 31 (1937) 1 bis 23
- [27] Brandenburger, L.: Ein neuer Gleichstromverstärker für Meßzwecke. Siemens-Zeitschrift 15 (1935) 467 bis 472
- [28] Brandenburger, L. und John, S.: Der Meßwert-Umformer, ein selbsttätiger Drehmoment-Kompensator zum Messen und Fernmessen verschiedener Größen mittels Gleichstrom. Siemens-Zeitschrift 20 (1940) 93 bis 98
- [29] Merz, L.: Elektrische Drehmomentkompensatoren für die Fernmessung und Regelungstechnik. Microtecnic 6 (1952) 287 bis 295
- [30] John, S.: Neue Geräte für die Fernmessung mit Transistoren. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 674 bis 679
- [31] Kunze, H., Muschik, A. und Aulmann, A.: Zeitmultiplex-Fernmessung. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 550 bis 554
- [32] Dittmann, J. und Darilek, H.: Elektronische Zeitmultiplex-Puls-Code-Fernmessung. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 288 bis 293
- [33] Weber, E.: Wasserstands-Fernmessung nach dem Impulstelegrammverfahren. Siemens-Zeitschrift 27 (1953) 369 bis 375
- [34] Türk, B.: Fernmessung nach dem Puls-Code-Verfahren. Siemens-Zeitschrift 30 (1956) 351 bis 357
- [35] Weber, E.: Betrachtungen der Methoden der Fernwirktechnik, insbesondere der Fernmeßtechnik mit Hilfe der Informationstheorie. Nachrichtentechn. Fachber. 16 (1959) 9 bis 14
- [36] Siemens-Kesselregelung. Ausgeführte Anlagen. Siemens & Halske AG. Druckschrift SH 7985 Cal 11 (Wernerwerk für Meßtechnik, 1960)
- [37] Moeller, M.: Selbsttätige Kesselregelung auf elektrischem Wege. Siemens-Zeitschrift 9 (1929) 408 bis 415
- [38] Moeller, M.: Einbau und Betriebsergebnisse der Siemens-Kesselregelung. Siemens-Zeitschrift 9 (1929) 457 bis 463
- [39] Lohmann, H. und Sieber, C.: Die elektrische Ringrohrfernübertragung. Siemens-Zeitschrift 8 (1928) 716 bis 725
- [40] Keinath, G.: Die Technik elektrischer Meßgeräte. 2. Bd. Oldenbourg, München und Berlin 1928, S. 315 ff.
- [41] Lohmann, H. und v. Grundherr, F.: Strömungsmanometer mit Wechselstromfernübertragung. Siemens-Zeitschrift 10 (1930) 37 bis 43
- [42] Kronmüller, H.: TELEPERM-Abgriff. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 664 bis 666
- [43] Himmler, C.: Über einen neuen kontinuierlichen elektrischen Regler. Arch. Elektrotechn. 29 (1935) 577 bis 599
- [44] Geyger, W.: Grundlagen der magnetischen Verstärker für die Meß- und Regeltechnik. Wiss. Veröff. Siemens-Werke 19 (1940) 4 bis 47
- [45] Siemens & Halske AG: Der neue Magnetikregler für Regelungen in der Wärmetechnik. Druckschrift SH 2556 a Cal 10 (Febr. 1955)
- [46] Keinath, G.: Die Messung hoher Temperaturen mit Ardometer und Holborn-Kurlbaum-Pyrometer. Siemens-Zeitschrift 1 (1921) 331 bis 340 und 358 bis 364
- [47] Lieneweg, F.: Temperaturmessung. In: Handb. techn. Betriebskontrolle, Hrsg. J. Krönert, 3. Bd., 3. Aufl. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, Leipzig 1959, S. 162 bis 376
- [48] Franz. Patent Nr. 770 460 v. 20. 3. 1934: Manomètre pour la mesure de la vitesse d'écoulement des fluides comportant des réservoirs cylindriques
- [49] Moeller, M.: Technische Gasanalyse durch Messung der Wärmeleitfähigkeit. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern 1 (1920 bis 1922) 147 bis 153, s. bes. S. 151, Bild 1
- [50] DRP 465 899 v. 5. 9. 1926: Einrichtung zur Bestimmung eines Bestandteils in einem Gemisch insbesondere von Gasen mit Hilfe der Absorption der vorzugsweise ultravioletten Gesamtstrahlung (Erfinder: H. Schmick)
- [51] Merz, L. und Scharwächter, H.: Magneto-elastische Druckmessung. Arch. techn. Messen (Nov. 1937) V. 132 bis 150
- [52] Ruska, E. und Wolff, O.: Ein hochauflösendes 100-kV-Elektronenmikroskop mit Kleinfelddurchstrahlung. Z. f. wiss. Mikroskopie u. mikroskop. Techn. 62 (1956) 465 bis 509
- [53] Berg, O., Noddack, W. und Tacke, I.: Zwei neue Elemente der Mangangruppe. Sitz.-Ber. Preuß. Akad. Wiss. (Sitzung d. math.-phys. Kl. v. 11. 6. 1925) 19 (1925) 400 bis 409
- [54] Berg, O. und Ernst, W.: Über einen Röntgenspektrographen und eine Spektraluntersuchungsröhre. Ergebnisse d. techn. Röntgen-Kde. 3 (1953) 1911 bis 1917
- [55] Tögel, K.: Spektrochemische Analyse mit Röntgenstrahlen. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 371 bis 379

Rationalisierung durch numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen

VON WERNER FEIST

Die Rationalisierung der vielfältigen Gebiete der Fertigungstechnik bekommt eine immer größere Bedeutung. Verkürzte Arbeitszeiten, steigende Löhne, allgemeiner Personalmangel u. a. m. machen es erforderlich, die Fertigungszeiten zu verringern, ohne daß der arbeitende Mensch körperlich oder geistig überlastet wird.

Bei der Einzelfertigung und der Fertigung kleiner und mittlerer Serien von Werkstücken bieten sich Verfahren an, die unter dem Namen »numerische Steuerungen« bekannt sind. Im folgenden wird über Entwicklungsarbeiten berichtet, die für diese Verfahren unter Verwendung analoger Meßmethoden durchgeführt wurden. Dabei sollen auch einige wesentliche Voraussetzungen mitgeteilt werden, die von den zu steuernden Werkzeugmaschinen erfüllt werden müssen.

Arbeitsablauf an Werkzeugmaschinen

Bei Werkzeugmaschinen werden Werkstück und Werkzeuge bei der Erzeugung der gewollten geometrischen Werkstückformen aufgrund von Informationen bewegt. Es hängt von der jeweiligen Maschine ab – wobei hier vor allem spanende Werkzeugmaschinen untersucht werden –, welche Informationen verfügbar sein müssen, wie diese Informationen in die Maschine einzugeben sind und durch welche Stellglieder sie die für den Arbeitsablauf erforderlichen Vorgänge auslösen.

Die Informationen werden verschiedenen Unterlagen entnommen. Am wesentlichsten ist die Konstruktionszeichnung des zu fertigenden Werkstückes. Außerdem sind Arbeitsanweisungen für das Werkstück und technische Angaben für die jeweilige Maschine und die zu verwendenden Werkzeuge vorhanden. Fast alle Informationen aus diesen Unterlagen werden als Ziffern oder Zahlen angegeben, die z. T. mit Einheiten versehen sind (z. B. Drehzahlen in U/min, Vorschübe in mm/U, Abmessungen in mm).

Der Arbeitsablauf wird wesentlich von dem an der Maschine tätigen Menschen beeinflusst: Er muß die ihm zugänglichen Informationen gedanklich verarbeiten und in zeitlich und örtlich richtiger Folge als Einstellbewegung auf die Maschine übertragen. Ferner muß er die Maschine, das Werkstück und die Werkzeuge visuell beobachten und aufgrund dieser Beobachtungen in den Bewegungsablauf der Maschine eingreifen.

Alle Hilfsmittel, die die dauernde Bindung des Menschen an die Maschine verringern sollen, zielen darauf hin, zu bestimmten Zeiten und (oder) an bestimmten Orten wenigstens einen Teil der erforderlichen Informationen selbsttätig in die Maschine einzugeben und in ihr zur Wirkung zu bringen. Man speichert diese Informationen und verbindet die Speicher so mit der Maschine, daß sie in gewollter Folge und gewünschter Genauigkeit die Maschine führen können.

Man kann die für den Betrieb der Maschine erforderlichen Informationen in zwei Gruppen einteilen: in Schaltinformationen und Weginformationen.

Bei der Einzel- und Serienfertigung und besonders bei Werkstücken mit komplizierten Formen und vielfältigen Arbeitsgängen ändern sich die Informationen sehr oft. Die Maschine muß dann häufig umgestellt werden und leistet während der Einrichtezeit keine produktive Arbeit.

Die Schaltinformationen lassen sich verhältnismäßig leicht ändern, z. B. bei Verwendung von Kreuzschienenverteiltern durch Wahl anderer Verbindungsstellen (z. B. durch Stecklochkarten).

Die Weginformationen werden aber überwiegend in Form körperlich ausgeführter Formspeicher vorgegeben. Jedes neue Werkstück oder jede Änderung des Werkstückes erfordert erneut die Herstellung oder Änderung eines solchen Speichers, und zwar mit Werkstattmitteln unter Einsatz hochwertiger Fachkräfte.

Man versucht nun, in logischer Weiterentwicklung die schon als Ziffern vorliegenden Informationen des Arbeitsvorganges unmittelbar zur Führung der Maschine heranzuziehen. Da die Maschine alle ihrem Einsatzbereich entsprechenden Möglichkeiten enthalten muß, wird die Auswahl für das jeweilige Werkstück durch ein Programm vorgenommen. Zum Herstellen dieses Programmes sollen Verfahren der Bürotechnik benutzt werden, denn der Arbeitsplatz im Büro ist billiger und gegen Umwelteinflüsse besser abschirmbar als die Maschine in der Werkstatt. Der Programmierer trägt also eine wesentliche Verantwortung für den optimalen Arbeitsablauf an der Maschine.

Das im Büro hergestellte Informationsprogramm soll sich schnell und ohne Irrtumsmöglichkeit in die Maschine

eingeben lassen. Zusammen mit möglicherweise vor-
eingestellten Werkzeugen werden damit kürzeste Ein-
richt- und Umstellzeiten erzielt. Der eine solche Maschine
führende Mensch kann sich im wesentlichen auf die Be-
obachtung des Arbeitsablaufes beschränken.

Eigenschaften der Werkzeugmaschinen und ihrer Steuerungen

Geht man von den Anforderungen aus, die ein Werk-
stück an die Bearbeitungsmaschine stellt, so ergibt sich
folgende Einteilung:

1. Werkstücke, die auf Maschinenbearbeitet werden kön-
nen, die ihre Werkzeuge absatzweise von Punkt zu
Punkt führen. Dabei sind zu unterscheiden:
 - a) Werkzeuge, die bei der Verstellbewegung im Ein-
griff mit dem Werkstück sind,
 - b) Werkzeuge, die bei der Verstellbewegung nicht im
Eingriff sind.

Eine Steuerung, die für Maschinen mit solchen Auf-
gaben verwendbar ist, wird Einzelpunktsteuerung
(auch Punkt-zu-Punkt-Steuerung oder Positionierung)
genannt.

2. Werkstücke, zu deren Bearbeitung die Werkzeuge
gleichzeitig in wenigstens zwei Richtungen nach vor-
gegebenem Programm geführt werden müssen.

Eine Steuerung, die für Maschinen mit solchen Auf-
gaben verwendbar ist, wird Stetigbahnsteuerung (oder
nur Bahnsteuerung) genannt.

Maschinen mit Einzelpunktsteuerung arbeiten mit
verhältnismäßig wenigen Informationen. Die Unter-
scheidung nach »Werkzeuge im Eingriff«, wie z.B. bei
einer Drehmaschine, und »Werkzeuge frei«, wie z.B. bei
einem Koordinatenbohrwerk, bezieht sich auf die
Reihenfolge und die Art des Einfahrens in den gewollten
Punkt. Im ersten Fall ist die Bewegungsfolge vorge-
schrieben und beim Einfahren in die Sollposition darf
kein Überschwingen auftreten. Im zweiten Fall ist
die Reihenfolge der Bewegungen beliebig und ein
Überschwingen ist in gewissen Grenzen zulässig. Der
überwiegende Teil der in den Betrieben eingesetzten
Maschinen wird mit solchen Einzelpunktsteuerungen
auskommen.

Maschinen mit Stetigbahnsteuerung erfordern dagegen
viele Informationen, die schnell verfügbar sein müssen.
Der Aufwand für solche Steuerungen ist daher insge-
samt größer als für Einzelpunktsteuerungen. Da Stetig-
bahnsteuerungen aber nur für bestimmte Anwendungs-
bereiche erforderlich sind, werden hier nur Einzel-
punktsteuerungen behandelt.

Eine Werkzeugmaschine muß bestimmte Eigenschaften
haben, um mit einer »numerischen Steuerung« arbeiten
zu können:

- a) Die Maschine muß auf Schaltinformationen mit aus-
reichender Schnelligkeit reagieren.
- b) Die Maschine muß Weginformationen verarbeiten
können.
- c) Die Führungsgenauigkeit bei der Bewegung der die
Werkzeuge tragenden Maschinenschlitten muß
der geforderten geometrischen Arbeitsgenauigkeit
entsprechen.

Die Steuerung muß außerdem die verschiedenen Anfor-
derungen im Rahmen der Einsatzmöglichkeiten der
Maschinen erfüllen können. Sie muß zweckmäßiger-
weise aus Bauteilen bestimmter Funktion bestehen, die
sich für die verschiedensten Aufgaben zusammensetzen
lassen.

Informationsträger

Mit den Geräten der Fernschreibtechnik stehen erprobte
und betriebssichere Einrichtungen zur Verfügung. Es
ist daher naheliegend, diese Geräte zu benutzen und be-
sonders den Fernschreibblockstreifen als Informations-
träger für Werkzeugmaschinen heranzuziehen.

Die Informationen, durch die die jeweilige Maschine
eine bestimmte Werkstückform erzeugen soll, liegen im
Lochstreifen in Form verschlüsselter Lochkombinationen
vor. Die Zeichen werden örtlich nacheinander auf dem
Lochstreifen angeboten und durch Lesegeräte oder Ab-
taster zeitlich nacheinander in die Maschinensteuerung
eingegeben. Dort müssen sie entschlüsselt (decodiert)
und ihrer Bedeutung nach stellenrichtig gespeichert
werden.

Über die Codierung der Lochstreifensignale für nume-
rische Steuerungen gibt es leider noch keine endgültigen
Empfehlungen*. Ebenso ist in Deutschland die Frage
der Verwendung des fünfspurigen oder des achtspurigen
Streifens noch nicht geklärt.

* s. VDI 3259, Entwurf März 1961

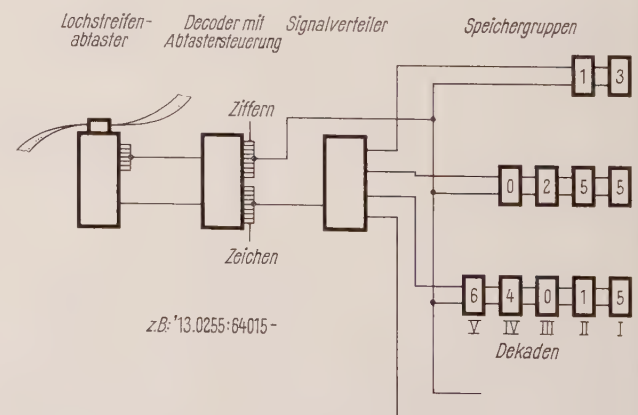


Bild 1 Lochstreifen-Signalgabe und Speicherung
(Blockschaltung)

Hier wird der Fünfspur-Lochstreifen der Fernschreibtechnik benutzt. Als Code wird der Fernschreibcode CCIT-Nr. 2 verwendet mit der Einschränkung, daß alle Informationen aus »Ziffern« (von 0 bis 9) zusammengesetzt werden und ihre Verteilung auf die einzelnen Gruppen (Vorschübe, Drehzahlen, Wege usw.) mit Hilfe der »Zeichen« der Fernschreibtechnik erzielt wird. Die Fernschreibmaschine kann dann beim Programmieren in ihrer Schaltstellung »Ziffern und Zeichen« stehenbleiben, und es entsteht ein gut lesbarer Klartext auf der Maschine, gleichzeitig mit dem Lochstreifen. Wenn später ein besonderer, z.B. prüfbarer Code empfohlen werden sollte, so lassen sich die Bauteile des hier verwendeten Systems leicht umschalten oder ergänzen.

Jede Informationsgruppe kann mehrere Ziffern enthalten, und die Informationen müssen stellenrichtig in Dezimalzahlen gespeichert werden. Die Stellenkapazität und auch die Bedeutung der einzelnen Gruppen ergibt sich aus den Notwendigkeiten der Maschine und des Meßsystems. In Bild 1 ist die Signalverteilung und die Speicherung in mehreren Gruppen schematisch dargestellt.

Nebenbei sei erwähnt, daß Maschinen, deren Informationsprogramm durch Lochstreifen eingegeben wird, fast immer auch für Handeingabe geeignet sein müssen. Durch Ansteuern der entsprechenden Speicher von Hand durch Schalter o.ä. läßt sich diese Forderung leicht verwirklichen.

Schaltinformationen

Die Maschine muß Schaltinformationen verarbeiten können. Es genügt, wenn dafür elektrische Signale an entsprechenden Speicherausgängen zur Verfügung stehen und der Maschine angeboten werden. Alles andere ist Aufgabe der eigentlichen Maschinenschaltung und der Maschinenkonstruktion. Ob nun diese Signale dazu benutzt werden, um z.B. Schaltgetriebe mit Elektromagnet-Kupplungen auf die gewünschten Geschwindigkeiten zu schalten, ob sie den Sollwert von Regelmotoren verändern oder ob bestimmte Werkzeuge in Tätigkeit kommen, hängt von der Ausgestaltung der Maschine ab.

Als Speicher für die verschiedenen Schaltinformationen dient ein »Funktionsspeicher«, der mit Relais aufgebaut ist (Bild 2, links). Er speichert die Ziffern von 0 bis 9. Weitere Relais in diesem Bauteil dienen der Weitergabe der Zeichen, die nacheinander einlaufen und die die entsprechenden Stellen der oft aus mehreren Funktionsspeichern bestehenden Speichergruppe füllen müssen. In einem Gerät ähnlicher Ausführung geschieht die Decodierung (»Decoder mit Abtastersteuerung«) und

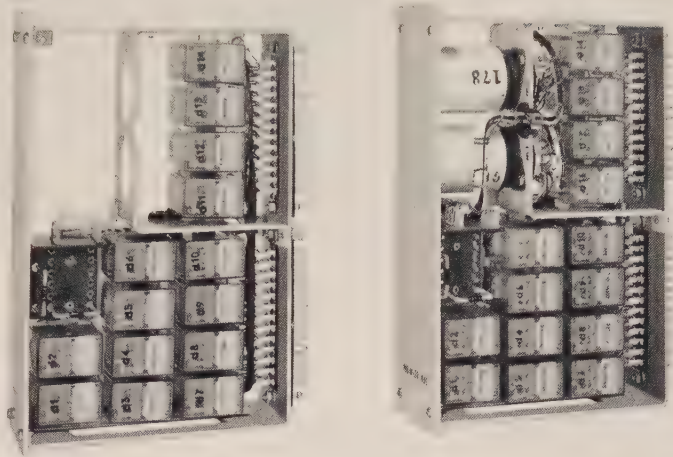


Bild 2 Funktionsspeicher (links) und Positionsspeicher (rechts) für numerische Steuerungen

die gruppenweise Weiterschaltung (»Signalverteiler«) der Ziffern.

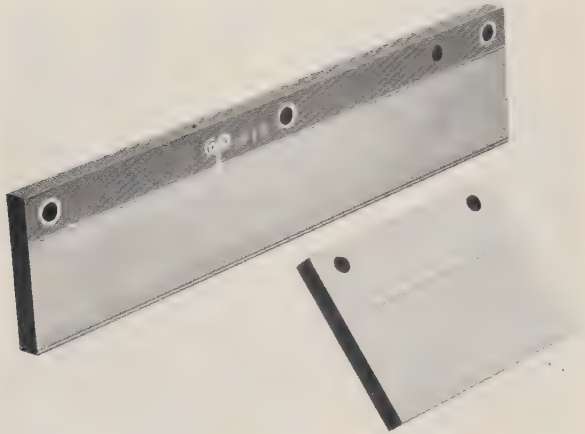
Die Speicher und ihre Anwahleinrichtungen machen es möglich, mit »verkürzten Programmen« zu arbeiten. Bei jedem Arbeitsschritt brauchen dabei nur diejenigen Informationen neu eingegeben zu werden, die tatsächlich zu ändern sind.

Wegmessung bei Werkzeugmaschinen

Numerische Steuerungen benötigen an den zu steuernden Maschinen für jede für den Arbeitsfortschritt erforderliche Bewegungsrichtung ein Meßsystem, das durch die Bewegung der Maschinenschlitten Signale erteilen kann, die dem Weg analog, also wertgleich sind. Dieses »aktive« Meßsystem muß folgende Eigenschaften haben:

- Es muß eine der Maschine und ihrem Verwendungsbereich entsprechende absolute Genauigkeit bei ausreichendem Auflösungsvermögen haben.
- Das Meßsystem muß auf jeden Punkt des zu durchfahrenden Weges mit guter Reproduzierbarkeit programmiert werden können, wobei sich die Programmierfeinheit, also das kleinste zu programmierende Wegelement, nach der Maschine und ihrem Verwendungsbereich richtet.
- Das Meßsystem muß bis zur Übereinstimmung von Soll- und Istwert Signale abgeben. Erwünscht sind wegababhängige und richtungbestimmende Führungssignale.

In der Fertigungstechnik gibt es keine absolute Genauigkeit. Jedes Maß ist toleranzbehaftet, jeder Werkstoff wird durch Belastung verformt oder durch Temperatureinflüsse in seinen Abmessungen verändert. Daher sind



Links: Maßstab (scale) Rechts: Reiter (slider)

Bild 3 Bauteile der INDUCTOSYN-Meßeinrichtung (Stahlausführung)

die Anforderungen an ein solches aktives Meßsystem einer Werkzeugmaschine sehr unterschiedlich und müssen genau abgewogen werden. Übertrieben hohe Forderungen an die absolute Genauigkeit des Meßsystems, die u. U. von der Werkzeugmaschine als Arbeitsgenauigkeit gar nicht eingehalten werden können oder von den Werkstücken her nicht benötigt werden, machen die Einrichtungen nur unnötig umfangreich und teuer.

Der Weg, den die Schlitten einer Maschine durchfahren, kann mittelbar über Zahnstangen und Ritzel oder durch Spindeln gemessen werden. Von der Präzision dieser mittelbaren Maßstäbe und ihrer Übertragungsglieder hängt die erzielbare Genauigkeit wesentlich ab.

Unmittelbare Maßstäbe, die berührungsfrei und ohne mechanische Übertragungselemente arbeiten, sind z. B. fotoelektrisch oder induktiv abtastbare Maßstäbe.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um dem Weg entsprechende Signale zu erzeugen. Bei der hier beschriebenen Einrichtung wird ein analog arbeitendes System verwendet, bei dem Wege als Spannungen dargestellt werden, die sich nach stetigen periodischen Funktionen über den Weg ändern. Programmiert wird als Sollwert eine Verschiebung der Nullstelle der sich periodisch ändernden Spannung. Der Istwert ist an dieser Nullstelle erreicht.

Bei Verwendung mittelbarer Maßstäbe sind die aktiven, messenden Elemente Drehmelder, und zwar Funktionsdrehmelder. Zwei dieser Drehmelder der Reihe T dm 3 sind im rechten Teil des in Bild 10 gezeigten Gerätes erkennbar.

Besteht die Forderung nach höherer Absolutgenauigkeit oder nach einem berührungs- und verschleißlosen »unmittelbar« arbeitenden Feinmaßstab, so wird zusätzlich das unter dem Namen INDUCTOSYN bekannte Meßsystem

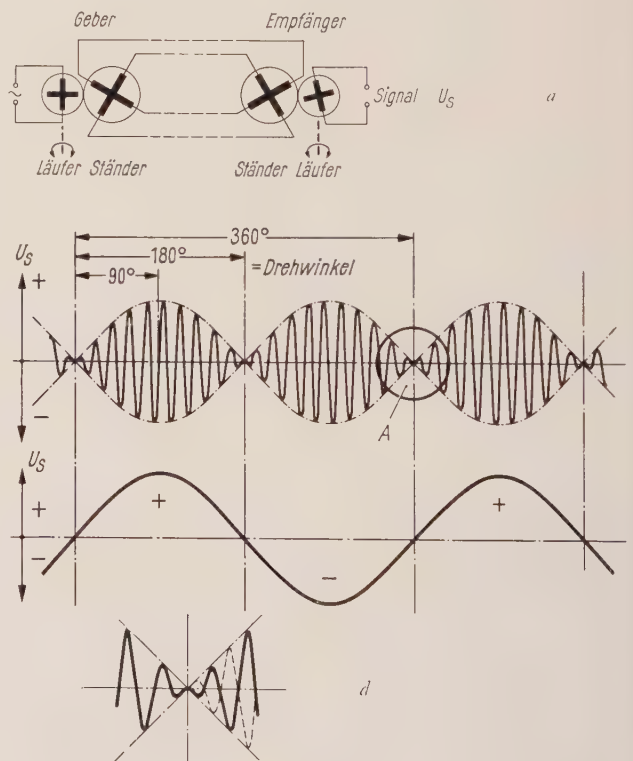
der Firma Inductosyn Corp., USA, verwendet. Bild 3 zeigt seine beiden Elemente: den Maßstab (scale) und den Reiter (slider).

Es ist günstig, daß das INDUCTOSYN-System in seinem Signalverhalten wie ein Drehmelder arbeitet und daher an die Geräte der Programmierung und Signalverarbeitung der Anlagen angeschlossen werden kann.

Die Systeme messen von einem beliebig festlegbaren Anfangspunkt aus. Damit kann die übliche Bemaßung der Zeichnungen beibehalten werden.

Wirkungsweise des Meßsystems

In der Grundschialtung in Bild 4a sind zwei Funktionsdrehmelder als Geber und Empfänger zusammenschaltet, indem ihre Ständerwicklungen gleichsinnig verbunden wurden. Wenn eine Läuferwicklung des Gebers mit einer Wechselspannung konstanter Amplitude gespeist wird, so erscheint an jeder der Läuferwicklungen des Empfängers eine Spannung, die sich durch die induzierten Spannungen zwischen den Wicklungen von Läufer und Ständer – beim Geber – und Ständer und Läufer – beim Empfänger – bildet. Dreht man nun z. B.



a Grundschialtung
b Ausgangsspannung einer Meßkette
c Ausgangsspannung, phasenempfindlich gleichgerichtet und geglättet
d Einzelheit bei A: Bei jedem Nulldurchgang wird die Phase der Ausgangsspannung um 180° (elektrisch) gedreht

Bild 4 Aus zwei Funktionsdrehmeldern aufgebaute Meßkette mit ihren Signalspannungen

den Läufer des Empfängers, so ergibt sich als Signalspannung einer der Läuferwicklungen des Empfängers ein Verlauf entsprechend Bild 4b. Die Scheitelpunkte der Spannung haben eine sich mit der Bewegung sinusförmig ändernde Amplitude. Nach je 180° Verdrehung wird die Ausgangsspannung praktisch Null.

Durch phasenrichtige Gleichrichtung (Demodulation) und leichte Glättung erhält man einen sinusförmigen Spannungsverlauf über den vollen Weg von 360° (Bild 4c), da sich bei jedem Nulldurchgang des Drehmelders der Spannungsvektor um 180 elektrische Grade dreht. Man kann der positiven und der negativen Halbwelle dieser Hüllspannung jeweils eine Bewegungsrichtung zuordnen.

Die beschriebene Drehmelderkette kann unmittelbar zur Wegmessung verwendet werden, wenn man einer Umdrehung des Läufers des mit dem Maschinenschlitten gekoppelten Empfängers einen bestimmten Weg zuordnet. Da man jeden Läufer relativ zu seinem Ständer und jeden Ständer relativ zu seinem Läufer verdrehen kann, läßt sich damit die Nullpunktverschiebung des Signales programmieren oder messen. Ein richtungsrichtiges Führungssignal erhält man nur, wenn man etwas weniger als 180° der Drehung ausnutzt.

Bild 5 zeigt den Verlauf der Signale bei der Programmierung für diesen einfachen Fall, in dem nur eine Kette verwendet wird. Die Winkelstellung des Gebers, die dem Verstellweg des Schlittens analog sein muß, ergibt die die Richtung bestimmende Signalspannung. Man kann diese Signalspannung unmittelbar als Führungsspannung für den Vorschub benutzen oder bei bestimmten Amplituden Schaltsignale ableiten, durch die eine wegabhängige Geschwindigkeitsumschaltung der Vorschubbewegungen erzielt wird. Die Schaltpunkte liegen in der Nähe der Nullstellen sehr genau, und gerade an diesen Stellen kommt die Maschinenbewegung zum Stillstand.

Die Schaltung des INDUCTOSYN (Bild 6) läßt erkennen, daß der Reiter des Systems mit den beiden um $1/4$ Periode versetzten Wicklungssystemen dem Ständer des Empfänger-drehmelders entspricht. Der Maßstab ist einer Läuferwicklung des Drehmelders gleichwertig. Der Reiter wird mit einem kleinen Luftspalt über den Maßstab hinweggeführt und induziert in ihm die Signalspannung. Die Spulensysteme des Reiters sind mehrfach ausgeführt und reichen über mehrere Perioden. Dadurch erhält man die erwünschte Mittelung über eine breite Zone.

Man kann nun Wege durch Verdrehen des Geberläufers programmieren und die dem Weg analoge Verstellung entweder von Hand oder motorisch vornehmen. Schneller als Geber und vor allem ohne rotierende Bewegungen beim Programmieren arbeiten Transformatoren.

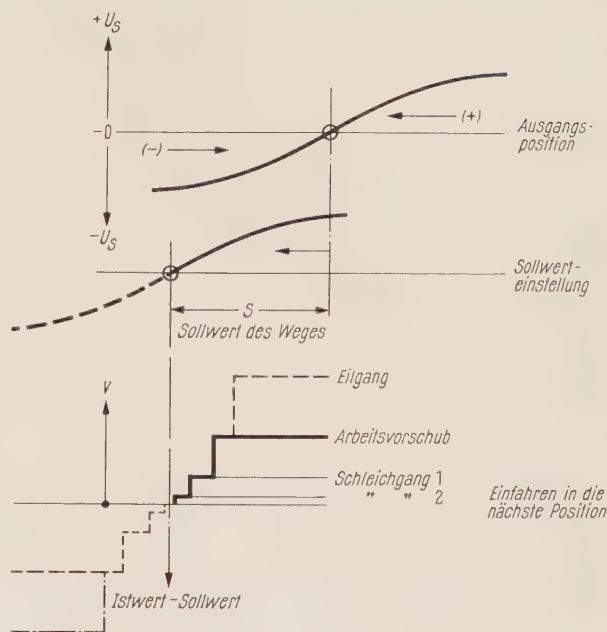
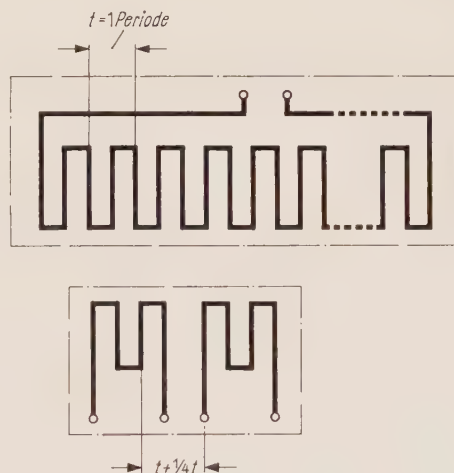


Bild 5 Signalverlauf bei der Programmierung einer Meßkette mit wegabhängiger Geschwindigkeitsumschaltung



Oben: Maßstab (scale) Unten: Reiter (slider)

Bild 6 Schematische Wicklungsanordnung beim INDUCTOSYN-System

Programmiertransformatoren haben dekadische Anpassungen; um mehrere Maßdekaden mit einem Wegmeßsystem programmieren zu können, ist ihre Schaltung entsprechend dem Additionstheorem von Winkelwerten ausgelegt. Transformatoren dieser Form wurden von der Farrand Controls Inc., USA, entwickelt. Zwei dieser Transformatoren sind in dem Positionsspeicher in Bild 2, rechts, zu erkennen.

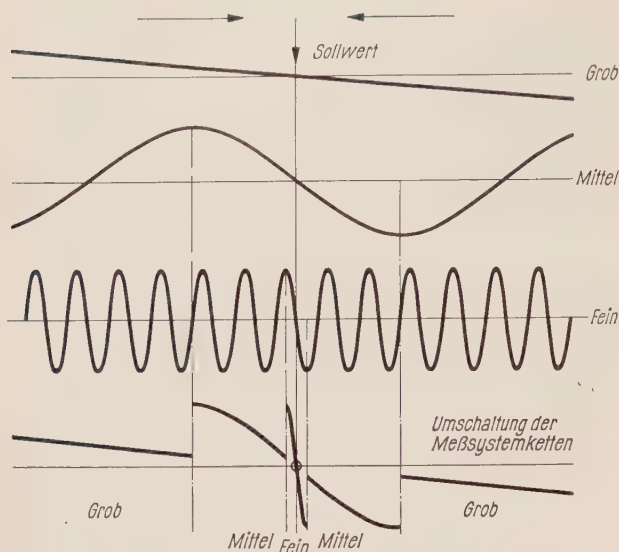


Bild 7 Signale und ihre Umschaltung bei Mehrfach-Meßketten

Genauigkeit

Das Meßsystem einer Werkzeugmaschine kann nur so genau sein wie der verwendete mittelbare oder unmittelbare Maßstab und seine Unterteilung.

Bei dem hier verwendeten Analogsystem mit stetigen periodisch wiederkehrenden Signalen werden mehrere Meßketten verwendet, die bezüglich ihrer Wirkung übereinander angeordnet werden. Auf eine Periode eines Grobsystems entfallen z.B. 10 oder 100 Perioden des Feinsystems. Damit darf der zulässige Fehler eines jeden Systems in sich z.B. 1% oder 1‰ betragen, wenn nur

die Periode des feinsten Systems ausreichend klein ist, um die gewünschte Auflösung zu erzielen.

Bild 7 zeigt die Signale einer dreifachen Meßkette, deren Stufung dem Faktor 10 entspricht. Die grobere Kette gibt jeweils das Richtungssignal. Die feineren Signale werden so lange unterdrückt, bis die Signalspannung der groberen Kette unter einen eingestellten Wert gesunken ist. Auf das feinere System wird dann umgeschaltet, wenn dessen Führungssignal richtungsrichtig etwa seinen Größtwert hat.

Drehmelder-Meßsysteme mit Spindeln oder Zahnstangen als mittelbare Maßstäbe wurden so ausgeführt, daß der feinste Geber einen Weg von 10 mm für eine Umdrehung darstellt. Die groberen Systeme sind mit dem Vergrößerungsfaktor 10 (oder 20) angeschlossen. Da die verwendeten Drehmelder einen Fehler von nur 10 Winkelminuten und weniger haben, kann der den Weg von 10 mm darstellende Drehmelder auf 0,1 mm (entsprechend 1 Teil in 100) und in Sonderfällen auch auf 0,01 mm (entsprechend 1 Teil in 1000) programmiert werden. Die Reproduzierbarkeit, also die Genauigkeit, mit der die gleiche Stellung angefahren wird, ist noch höher.

Bei der Programmierfeinheit von 0,01 mm sind sowohl die Zahnstangen als auch die meisten Spindeln in ihrer Absolutgenauigkeit sicher schon überfordert, aber beim Verfahren kleiner Wege kann die größere Auflösung noch einige Vorteile bringen.

Wenn Maschinen mit Meßsystemen höherer Absolutgenauigkeit ausgerüstet werden müssen, so wird das INDUCTOSYN-System verwendet und im Verhältnis 1:5 oder 1:10 an das feinste Drehmetersystem angekoppelt. Die Programmierung ist dann auf 0,01 mm und weniger möglich, da die absolute Genauigkeit eines INDUCTOSYN-Maßstabes – richtige Anbringung und ausreichende Temperaturkonstanz vorausgesetzt – bei $\pm 0,0025$ mm je 250 mm liegt. Die Maßstäbe können bis zu großen Längen aneinandergesetzt und auf kleinsten Gesamtfehler bei der Justierung abgeglichen werden. Die Reproduzierbarkeit des gleichen Maßes ist noch besser als die Programmierfeinheit. Sie wird wesentlich durch Eigenschaften der Maschine bestimmt.

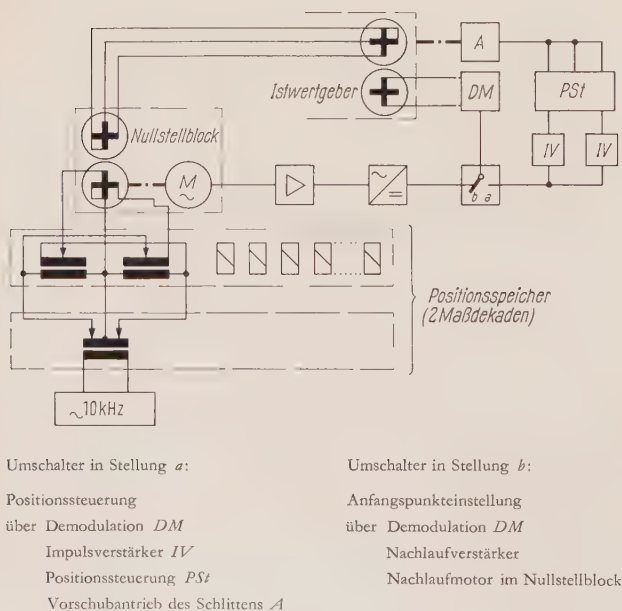
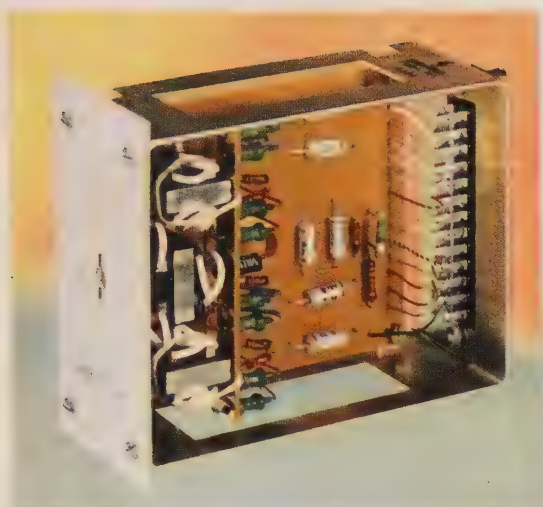


Bild 8 Schematischer Aufbau einer Meßkette

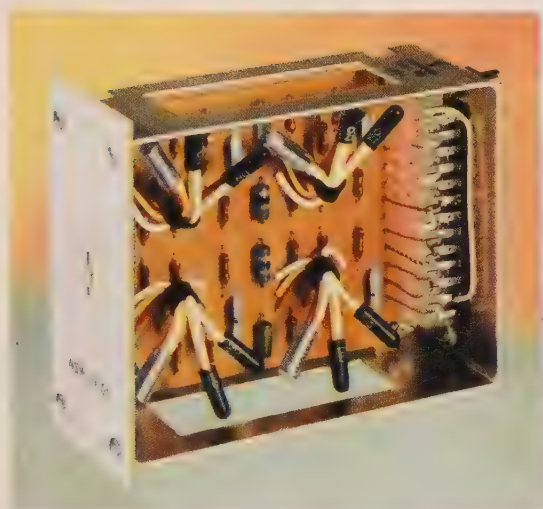
Aufbau der Meßketten, Speicherung und Verarbeitung der Weginformationen

Über die Anzahl der Meßketten in einer Bewegungsrichtung entscheidet die gewünschte Genauigkeit und die Bewegungslänge, die vom Meßsystem in einem Zuge überstrichen werden muß. Die Meßketten werden mit sich wiederholenden Bauteilen hergestellt (Bild 8).

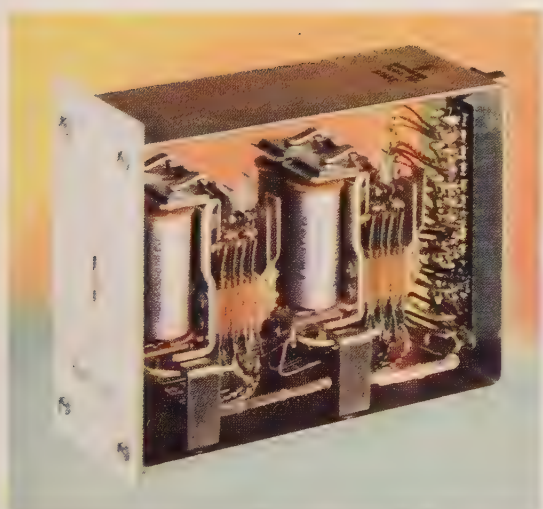
Alle Meßketten einer Bewegungsrichtung werden gemeinsam von einem Leistungsgenerator mit einer Wechselspannung konstanter Amplitude und einer



Demodulation



Impulsverstärker



Relaisverstärker

Bild 9 Geräte der Meßketten

Frequenz von 10 kHz gespeist. Die Programmierung geschieht durch Transformatoren, die unmittelbar in Speicherdekaden eingebaut sind. Diese »Positionsspeicher« (s. Bild 2, rechts) sind ähnlich gebaut wie die Funktionspeicher. Sie speichern jeweils eine Maßdekade und haben dabei die Bedeutung von Digital-Analog-Wandlern. Über die Wertigkeit des jeweiligen Speichers entscheidet seine Stellung innerhalb der Maßzahl und seine Bestückung mit Transformatoren. Das Ausgangssignal jeder Meßkette wird phasenrichtig gleichgerichtet. Die entstehende Gleichspannung wird, wenn die Maschine schaltbare Geschwindigkeitsstufen hat, über Impulsverstärker zu wegababhängigen Schaltsignalen ausgewertet.

Es ist eine Frage des Aufwandes und der Notwendigkeit, ob die Signale der Meßketten kontaktlos oder z. B. über Zwischenrelais weitergegeben werden. Die Bauteile der Meßketten – z. B. Leistungsgenerator, Demodulationen, Impulsverstärker, Relaisverstärker – sind als steckbare Geräte gleicher Größe ausgeführt. Einige dieser Geräte zeigt Bild 9.

Die verwendete absolut messende Einrichtung hat einen definierten Anfangspunkt, auf den sich die Maße beziehen. In der Mehrzahl der Fälle muß der Anfangspunkt für die einzelnen Werkstücke fest eingestellt werden können.

In der Anordnung entsprechend Bild 8 wird für das Einstellen des Anfangspunktes einer Meßkette ein besonderes Nachlaufsystem eingesetzt. Auf ein Startsignal hin, von Hand oder durch den Lochstreifen erteilt, wird ein als elektrisches Differential geschalteter Funktionsdrehmelder in der Meßkette durch einen Nachlaufmotor so lange verdreht, bis das Meßkettensignal Null wird. Bild 10 zeigt einen solchen Nullstellblock, in dem zwei Meßketten unabhängig voneinander abgeglichen werden können. Die Signale der Demodulationen werden durch eine besondere Schaltung unmittelbar zur Führung des Nachlaufkreises ausgenutzt.

Werden bei der Maschine eine oder mehrere Bewegungsrichtungen mit INDUCTOSYN-Maßstäben ausgerüstet, so ändert sich an der Schaltung der Meßketten grundsätzlich nichts. Es werden nur zusätzlich Übertrager zur Anpassung der Programmierung an den Reiter benötigt, und das Signal des Maßstabes wird über einen Transistor-Vorverstärker an der Maschine auf das Niveau der Demodulation oder der Impulsverstärker angehoben.

Anwendung

Mit den hier geschilderten Bauteilen und Geräten ist es möglich, für jede Maschine, deren Arbeitsverfahren sich überhaupt dafür eignet, eine numerische Steuerung zu planen und zu bauen. Die Geräte werden in Rahmen in einem Steuerpult zusammengefaßt.

Es ist zu erwarten, daß die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen im Laufe der nächsten Jahre ein

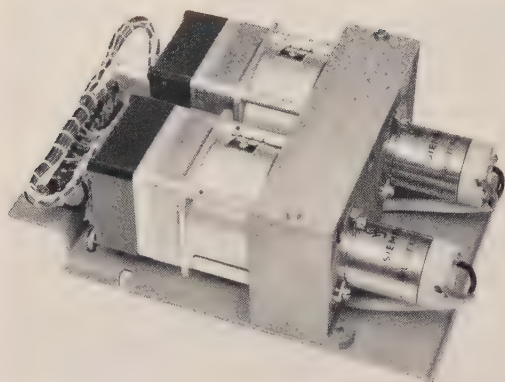


Bild 10 Nullstellblock, bestückt für den Abgleich von zwei Meßketten. Rechts: Funktionsdrehmelder; links: Nachlaufmotoren

sehr großes Anwendungsgebiet findet. Es sei aber nochmals betont, daß nicht nur die Steuerungen alle vernünftigerweise zu stellenden Forderungen erfüllen müssen, sondern daß auch die Werkzeugmaschinen selbst dem Zweck und den Eigenschaften numerischer Steuerungen entsprechen müssen. Darüber hinaus ist in den Betrieben noch viel Arbeit zu leisten, bis die Einbeziehung solcher Maschinen in die heutige Fertigungstechnik erfolgreich vollzogen ist.

Schrifttum

- [1] Kronenberg, M.: Die amerikanische Werkzeugmaschinen-Ausstellung in Chicago 1960. Werkstatt u. Betr. **94** (1961) 1 bis 28
 - [2] Feist, W.: Ein Beitrag zur Systematik der Elemente der Steuer- und Regelungstechnik von Werkzeugmaschinen. VDI-Z. **100** (1958) 1559 bis 1566
 - [3] Simon, W.: Gedanken zur praktischen Gestaltung zahlengesteuerter Werkzeugmaschinen. Werkstatt u. Betr. **93** (1960) 693 bis 701
 - [4] de Beaulclair, W.: Datenträger für automatische Werkzeugmaschinensteuerungen. Werkstattstechn. **50** (1960) 131 bis 136
 - [5] Lölkes, E. und Voelcker, S.: Lochstreifengeräte für Sonderzwecke. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 585 bis 591
- Die Quellen [2 bis 4] enthalten viele weitere Hinweise auf Schrifttum.

Betriebsgüte-Meßeinrichtungen für Wähl-Vermittlungsanlagen

VON UDO SCHLICHT

Beurteilt der Fernsprechteilnehmer die Güte einer Vermittlungsanlage fast ausschließlich nach der Qualität des ihm gebotenen Dienstes, so möchte die für den technischen Betrieb zuständige Verwaltung darüber hinaus wissen, welche Anlagen- und Unterhaltungskosten für eine bestimmte Betriebsgüte aufzubringen sind. Da der Aufwand für Wartung und Pflege bei neuzeitlichen Vermittlungssystemen immer unbedeutender wird, kann unter dem Begriff Unterhaltung vor allem das Beseitigen von Fehlern verstanden werden; diese sind damit ein wesentlicher Maßstab für die Beurteilung der Güte-merkmale einer Fernsprechanlage [1 bis 5].

Für die Fehlerstatistik werden bei den meisten Verwaltungsstellen die vom Wartungspersonal vorgenommenen Eintragungen im Störungsbuch zugrunde gelegt. Da solche Angaben häufig subjektiv sind und auch keine Aussage über den Zusammenhang zwischen der Anzahl der erfolgreichen und der gestörten Verbindungen enthalten, können sie lediglich Anhaltspunkte für die Beurteilung des Gütezustandes einer Vermittlungsanlage geben. Eine objektive Bewertung ist dagegen mit Hilfe von Maßeinrichtungen möglich, die Probeverbindungen aufbauen und diese prüfen [6], also Meßergebnisse auf der Grundlage statistischer Stichproben-Erhebungen liefern [7].

Die von Siemens & Halske entwickelte Betriebsgüte-Meßeinrichtung ist überwiegend für Prüfungen in Ortsnetzen bestimmt (Bild 1). Sie stellt selbsttätig Probeverbindungen her, verfolgt den Verbindungsaufbau, prüft die Übertragungseigenschaften dieser Verbindungen, registriert auftretende Störungen und Hemmungen und hält – falls erwünscht – über einen gesonderten Prüfkreis die Verbindungen bis zur Beseitigung des Fehlers, der die Störung verursacht hat [8, 9]. Unter Hemmungen versteht man die Fälle, in denen nicht genügend Vermittlungseinrichtungen zur Verfügung stehen, also Verluste oder Wartezeiten auftreten.

Aufbau der Maßeinrichtung

Die Betriebsgüte-Meßeinrichtung ist transportabel und besteht aus einem automatischen Nummerngeber (Meßkoffer *N*), einem Eingangskoppelfeld zum Anschalten an 25 Teilnehmerschaltungen (Meßkoffer *K*), einer Programmablaufsteuerung mit Meß- und Prüfeinrichtungen (Meßkoffer *P*) und einem »Automatischen Teilnehmer« mit zusätzlichen Meß- und Prüfeinrichtungen (Meßkoffer *T*), der an 24 Teilnehmerschaltungen angeschlossen wird (Bilder 1 und 2).

Für ein Meßprogramm können am automatischen Nummerngeber mit Hilfe von Drehschaltern bis zu

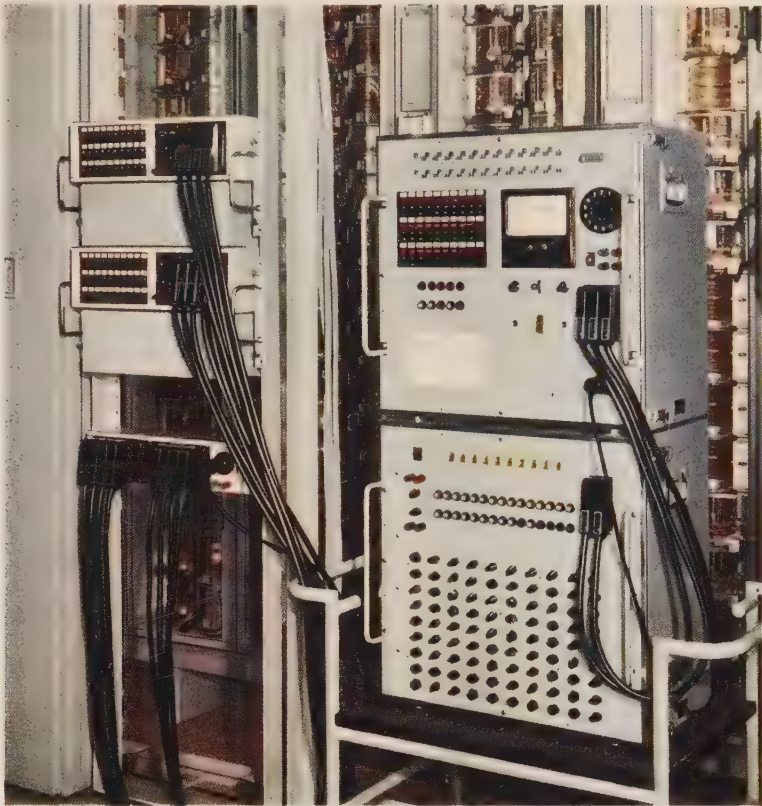


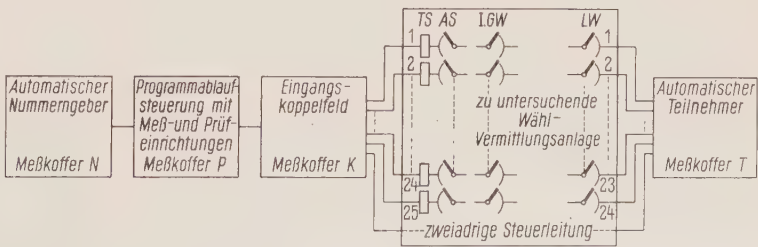
Bild 1 Betriebsgüte-Meßeinrichtung zur statistischen Ermittlung von Meßwerten in einem EMD-Ortswählm. Links oben der Automatische Teilnehmer, darunter Eingangskoppelfeld und Anschalteschiene, rechts oben Programmablaufsteuerung, darunter automatischer Nummerngeber

24 zehnstellige Rufnummern eingestellt werden. Die Wählimpulse erzeugt ein elektronischer Impulsgenerator, der von Schleifen- auf Arbeitsstrom-Impuls-gabe umschaltbar ist. Die Länge der Impulse und Pausen läßt sich entsprechend der zugelassenen Nummernschalter-Toleranzen im Bereich von 30 bis 80 ms verändern. Jeder der 24 Rufnummern ist eine Leucht-Drehtaste zugeordnet, deren Aufleuchten die gerade gesendete Rufnummer anzeigt; durch Drehen dieser Tasten lassen sich Rufnummern sperren. Auf einem Nummernanzeigesystem mit 10 mm hohen Ziffern erscheint zur Kontrolle die jeweils gesendete Rufnummer.

Das Eingangskoppelfeld schaltet die Betriebsgüte-Meßeinrichtung an das zu untersuchende System. Es hat die Aufgabe, die mit Hilfe der 24 Rufnummern aufzubauenen Probeverbindungen über 25 Teilnehmerschaltungen in die Fernsprechanlage einzustreuen [7, 10]. Wenn alle Teilnehmerschaltungen angeschlossen sind, wird bei zyklischer Vertauschung die erste Rufnummer erst nach 600 Umläufen wieder über die erste Teilnehmerschaltung gesendet. Darüber hinaus empfiehlt es sich, aus jeder 100er-Gruppe von Teilnehmerschaltungen nur wenige Rufnummern zu verwenden.

Die Messungen sollen nur in Zeiten vorgenommen werden, die dem normalen Betriebszustand der Wähl-Vermittlungsanlage entsprechen, am besten in einer Zeit, in der die Anlage sehr häufig benutzt wird, z. B. von 9 bis 12 Uhr und von 14 bis 17 Uhr. Messungen zu Zeiten geringen Verkehrs, vor allem bei Nacht, hätten falsche Meßergebnisse zur Folge, da dann der reguläre Verkehr keinen statistischen Einfluß mehr beim Belegen der Schaltglieder und Verbindungswege hat.

Die ausgesuchten freien Teilnehmerschaltungen – auch Prüfnummern lassen sich verwenden – werden vom



TS Teilnehmerschaltung AS Anrufsucher GW Gruppenwähler LW Leitungs-wähler

Bild 2 Zusammenschaltung der einzelnen Meßkoffer für Betriebsgütemessungen an einer Wähl-Vermittlungsanlage

Hauptverteiler mit einer Anschalteschiene verbunden und von hier aus über 30teilige Verbindungskabel an die Meßeinrichtung angeschlossen. Mit Sperrtasten kann man einzelne Anschlußleitungen, die z. B. durch eine Störung längere Zeit blockiert sind, ausschalten und damit beim weiteren Prüfablauf übergehen. Ein Kontrolllampenfeld zeigt den jeweils belegten Eingang an.

Die Programmablaufsteuerung als zentrale Einrichtung gibt die für einen vollständigen Verbindungsaufbau notwendigen Steuerbefehle an den automatischen Nummerngeber, das Eingangskoppelfeld und den Automatischen Teilnehmer. Während des Verbindungsaufbaues und danach ermitteln die zur Programmablaufsteuerung gehörenden Meß- und Prüfeinrichtungen zusammen mit den vorher genannten Geräten, ob eine Störung oder Hemmung innerhalb der Verbindungswege aufgetreten ist. Signallampen zeigen die jeweils stattfindende Prüfung sowie die ermittelten Hemmungen und Störungen an. Diese werden außerdem je nach Art auf Zählern registriert; ein Summenzähler erfaßt die Gesamtzahl der Verbindungsversuche.

Grundsätzlich kann man zwischen zwei Betriebsarten wählen: Bei einer Hemmung oder Störung wird entweder die Verbindung ausgelöst, die Hemmung oder Störung von Zählern registriert und automatisch die nächste Verbindung aufgebaut (s. Bild 1) – oder es wird, nach vorheriger Einstellung entsprechender Tasten

»Halt bei Fehler«, der Prüfablauf gestoppt und ein Alarm-signal gegeben. Die letztgenannte Betriebsart ist dann zweckmäßig, wenn die Fehler, die Störungen verursacht haben, sogleich beseitigt werden sollen. Dazu läßt sich die fehlerhafte Verbindung auf einen manuell zu betätigenden Meßkreis schalten, so daß die Betriebsgüte-Meßeinrichtung hiervon unabhängig weitere Verbindungen herstellen und prüfen kann (Bild 3). Interessieren nicht alle Kontrollen, so kann das Prüfprogramm vorzeitig abgebrochen werden. Dazu betätigt man vor Prüfbeginn die der letzten gewünschten Prüfung zugeordnete Taste »Rückstellung«.

Der Automatische Teilnehmer wird, ähnlich dem Eingangskoppelfeld, mit Hilfe der Anschalteschiene über 30teilige Verbindungskabel mit 24 freien Teilnehmer-schaltungen verbunden; er stellt den für automatische Probeverbindungen notwendigen Abschluß der Prüfverbindung dar. Während der Prüfung wird die Nummer des jeweils belegten Einganges durch eine Kontrollampe angezeigt und der Programmablaufsteuerung ein der entsprechenden Rufnummer zugeordnetes Kennzeichen mitgeteilt. Außerdem werden Störungen, die nur der angerufene Teilnehmer feststellen kann, der Programmablaufsteuerung zur Auswertung gemeldet und von Zählern registriert. 24 Klinken ermöglichen eine manuelle Prüfung einzelner Leitungen, ohne daß der weitere automatische Prüfablauf dadurch behindert wird.



Bild 3 Fehlersuche mit der Betriebsgüte-Meßeinrichtung in einem EMD-Ortswähllamt. Neben dem automatischen Nummerngeber (links) die Programmablaufsteuerung

Für Restdämpfungsmessungen enthält der Automatische Teilnehmer einen 800-Hz-Generator, der eine Meßspannung mit dem Pegel 0 dB an die zu prüfende *a/b*-Ader legt. Bei Geräuschspannungsmessungen wird die betreffende Prüfverbindung mit 600 Ω abgeschlossen.

Ablauf der Prüfungsvorgänge

Die Betriebsgüte-Meßeinrichtung wird von der Programmablaufsteuerung aus, also zentral eingeschaltet. Lediglich der Automatische Teilnehmer schaltet sich bei einer Belegung der Teilnehmerschaltung des gerufenen Teilnehmers über die *c*-Ader selbst ein. Vor Meßbeginn wird der Verstärker in der Programmablaufsteuerung mit Hilfe eines 800-Hz-Tones geeicht; erst nach Rückstellen der Eichaste ist es möglich, den Prüfablauf durch Drücken einer Taste zu starten.

Wenn sich der Eingangskoppler auf den ersten mit einer Teilnehmerschaltung verbundenen Ausgang eingestellt hat, melden die Teilgeräte ihre Sendebereitschaft, d. h., der automatische Nummerngeber steht auf einer eingestellten Nummer, der Eingangskoppler hat eine zur Wähl-Vermittlungsstelle führende Leitung, die nicht von einem natürlichen Teilnehmer belegt ist, durchgeschaltet, und auch der Automatische Teilnehmer ist frei (Meldung über die Steuerleitungen). Die Prüfungen können beginnen. Der Einfachheit halber wird bei der Beschreibung des Prüfablaufs der rufende Teilnehmer – also die Programmablaufsteuerung, der automatische Nummerngeber, das Eingangskoppelfeld und die jeweils belegte Teilnehmerschaltung – als A-Teilnehmer und der Automatische Teilnehmer als B-Teilnehmer bezeichnet. Im folgenden ist als Beispiel eine Betriebsgüte-Meßeinrichtung für ein EMD-System mit Markierung und mit Hörzeichen zugrunde gelegt, wie sie in der Südafrikanischen Republik üblich sind.

Bei der Kontrolle der abgehenden *c*-Ader auf Unterbrechung wird diese nach Schließen der Schleife beim A-Teilnehmer auf Erdpotential geprüft. Die Prüfung erstreckt sich über die gesamte Belegungsdauer der Teilnehmerschaltung.

Eine Kontrolle auf Wähltonausfall und Schleifenunterbrechung ist dadurch möglich, daß das Potential der *b*-Ader zu erkennen gibt, ob aus der Teilnehmerschaltung oder aus dem Relaisatz *A* gespeist wird. Ein Wähltonausfall liegt bei Speisung aus dem Relaisatz und fehlendem Wählton vor, eine Schleifenunterbrechung bei fehlender oder länger als 3 s unterbrochener Speisung.

Wird nach einer vorgegebenen Zeit noch aus der Teilnehmerschaltung gespeist, ist also die Zeit für das Warten auf den Wählton zu groß, so wird das als Hemmung angezeigt. Länger als diese Zeit soll im Mittel höchstens ein geringer Prozentsatz der Teilnehmer warten.

Der Wählton des in diesem Fall zu prüfenden Systems besteht aus einem Dauerton tiefer Frequenzen. Es wird geprüft, ob dieser Ton 500 ms lang mit einer Amplitude von mindestens 10 mV anliegt. Durch diese Art der Messung ist eine klare Unterscheidung des Wähltons von etwa auftretenden Geräuschen möglich.

Zur Besetztkontrolle werden Rhythmus und Spannung des Besetzttones geprüft. Die Maßeinrichtung bietet zwei Möglichkeiten: Erstens kann nach jeder Wählimpulsreihe, also auch der letzten, geprüft werden, wobei zu erkennen ist, in welcher Wahlstufe eine Hemmung oder Störung vorliegt. Bei der zweiten Prüfmethode wird lediglich nach der letzten Impulsreihe kontrolliert, ob während des gesamten Verbindungsaufbaues ein Besetztton aufgetreten ist. Die Ergebnisse werden je nach Art auf Zählern registriert.

Unter Teilnehmerkontrolle wird die Prüfung verstanden, ob der gewählte Teilnehmer erreicht wurde. Ist der B-Teilnehmer über die *c*-Ader belegt, so meldet er dies über die Steuerleitungen an die Programmablaufsteuerung. Wenn dieses Signal vor Aussenden der letzten Impulsreihe durch den automatischen Nummerngeber erscheint, hat ein anderer Teilnehmer den B-Teilnehmer belegt: Die Maßeinrichtung wird angehalten, bis diese Belegung beendet ist. Erscheint das Signal nach Aussenden der letzten Impulsreihe und hat der A-Teilnehmer während der vorgegebenen Wartezeit den Besetztton nicht erhalten, so hat die Maßeinrichtung den B-Teilnehmer belegt. Die Programmablaufsteuerung fordert dann über die Steuerleitungen vom B-Teilnehmer eine Impulsreihe an, die den angewählten unter den 24 B-Teilnehmern identifiziert. Wurde ein falscher B-Teilnehmer erreicht, so registriert ein Zähler, daß der B-Teilnehmer nicht erreicht wurde. Derselbe Zähler spricht an, wenn der B-Teilnehmer nach der vorgegebenen Zeit nicht belegt wird oder wenn nach Aussenden der letzten Impulsreihe innerhalb der eingestellten Zeit der Besetztton eintrifft.

Nach der Identifizierung des B-Teilnehmers beobachtet die Betriebsgüte-Meßeinrichtung, ob in einem Zeitraum von 6 s zwei Hörzeichen mit einer Impulslänge von mehr als 300 ms und einer Amplitude von mindestens 3 mV auftreten (Freitonkontrolle). Das Ergebnis wird gespeichert und erst nach der Dämpfungskontrolle ausgewertet. Auf diese Weise können auch sehr hohe Dämpfungen gemessen werden, da der Prüfablauf trotz Ausfall des Freitones nicht abgebrochen wird. Während der 6 s dauernden Freitonkontrolle findet die Rufkontrolle statt. Fällt der Ruf aus, so sendet der B-Teilnehmer über die Steuerleitungen ein Signal zurück. Andernfalls erhält der B-Teilnehmer den Befehl zum Schließen der *a/b*-Schleife.

Bei der Kontrolle des Zählimpulses über die *a/b*-Adern prüft die Programmablaufsteuerung das Ein-

treffen der Zählimpulse mit einer an die Empfindlichkeit des Gebührenanzeigers angelegten Relaischaltung. Bei der Kontrolle des Zählimpulses über die z-Ader wird unterschieden zwischen »keine Zählung« und »falsche Zählung« durch Eintreffen des Zählimpulses vor Schleifenschluß oder durch Mehrfachzählung, d. h. Eintreffen von mehr als einem Zählimpuls.

Zur Dämpfungskontrolle, die 10 s dauert, fordert die Programmablaufsteuerung über die Steuerleitungen den B-Teilnehmer auf, einen 800-Hz-Ton mit dem Sendepiegel von 0 dB an die a/b-Adern zu legen. Außer der Anzeige auf einem Zeigerinstrument ist eine automatische Störungszählung bei Überschreiten eines bestimmten, auf einem Kontaktinstrument kontinuierlich einstellbaren Dämpfungswertes möglich. Drei Meßbereiche erfassen Restdämpfungen von ∞ bis 0 dB.

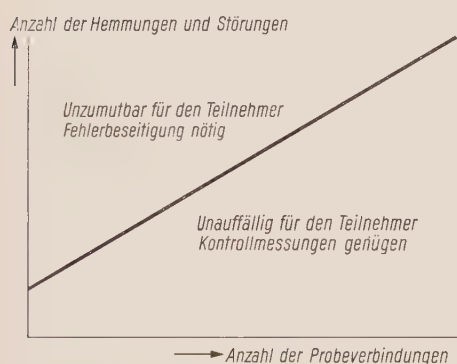


Bild 4 Grenzwerkurve der von einer Fernsprechverwaltung für eine bestimmte Betriebsgüte zugelassenen Hemmungen und Störungen (grundsätzliche Darstellung)

Die Programmablaufsteuerung gibt über die Steuerleitungen dem B-Teilnehmer das Ende der Dämpfungskontrolle bekannt. Dieser trennt die a/b-Adern vom 800-Hz-Generator, so daß nun die ebenfalls 10 s währende Dauergeräuschspannungs-Kontrolle beginnen kann. Sie entspricht hinsichtlich der A-Filterbewertung den Empfehlungen des CCITT; wie bei der Dämpfungskontrolle kann zwischen einer visuellen Anzeige und einer automatischen Störungszählung mit kontinuierlich einstellbaren Grenzwerten gewählt werden. Für Spannungen von 0 bis 100 mV sind acht Meßbereiche vorgesehen. Damit bei der vom CCITT empfohlenen Zeitkonstante von 200 ± 50 ms die am Instrument noch sichtbaren kurzzeitigen Geräuschspannungsspitzen nicht sofort bei Überschreiten des Grenzwertes zur Störungsanzeige führen, darf dieser Grenzwert eine bestimmte Zeit lang überschritten werden. Für weitere Untersuchungen ist der Anschluß eines zusätzlichen Geräuschspannungsmessers möglich.

Zur Kontrolle der vorzeitigen Auslösung wird am Ende der Dauergeräuschspannungsprüfung noch einmal vom B-Teilnehmer auf Veranlassung der Programmablaufsteuerung der 800-Hz-Ton an die a/b-Ader gelegt und geprüft, ob während der Dauergeräuschspannungskontrolle vorzeitig ausgelöst worden ist.

Am Schluß aller Prüfvorgänge steht die Auslöschungskontrolle. Der B-Teilnehmer wird vom A-Teilnehmer über die Steuerleitungen aufgefordert auszulösen, also die a/b-Schleife aufzutrennen. Danach löst der A-Teilnehmer selbst aus. Der B-Teilnehmer wird erst dann frei, wenn vom A-Teilnehmer bis zum Leitungswähler ausgelöst ist. Ist dies geschehen, so meldet der B-Teilnehmer die erfolgreiche Auslösung über die Steuerleitung zurück. Andernfalls wird der Prüfablauf so lange unterbrochen, bis das Amtspersonal die Auslösung herbeiführt.

Betriebsgütemessungen sind ein wirtschaftliches und zuverlässiges Verfahren zum Ermitteln und Registrieren von Störungen und deren Häufigkeit; außerdem liefern sie Zahlenwerte für die Berechnung der Hemm- und Störkoeffizienten sowie der Fehlerkoeffizienten [2], die den Gütezustand der Vermittlungsanlage kennzeichnen und einen Vergleich sogar verschiedenartiger Anlagen ermöglichen.

Besondere Bedeutung gewinnen Betriebsgüte-Meßeinrichtungen für die dauernde Kontrolle unbemannter Wählanlagen [3, 6]. Eingriffe sind erst dann zu empfehlen, wenn die von der Meßeinrichtung ermittelten Hemmungen und Störungen eine Höhe erreichen, deren weitere Zunahme die Benutzer der Wählanlage als erhebliche Minderung der Betriebsgüte empfinden (Bild 4). Für das Auswerten der Betriebsgütemessungen in zentralen Meßwert-Sammelstellen können als Hilfsmittel Lochstreifen und Lochkarten dienen.

Schrifttum

- [1] Etzel, F.: Wartung und Pflege in Fernsprech-Wählanlagen. Siemens & Halske AG, SH 6562
- [2] Nachrichtentechnische Gesellschaft (NTG): Definitionen für Gütemerkmale in der Vermittlungstechnik. Nachr.-techn. Z. **12** (1959) 263 bis 264
- [3] Müller, H.: Bewertung vermittlungstechnischer Anlagen durch Gütemerkmale. Nachr.-techn. Z. **13** (1960) 266 bis 270
- [4] Mehli, A.: Der doppelte Begriff der Betriebsgüte. Nachr.-techn. Z. **10** (1957) 291 bis 293
- [5] Padberg, T.: Betriebsfragen der Vermittlungstechnik. Fernmeldepraxis **37** (1960) 761 bis 777
- [6] Rose, A.: Ermittlung der Betriebsgüte von Wählvermittlungsstellen durch Probeverbindungen. Ing. Deutsche Bundespost **9** (1960) 44 bis 47
- [7] Störmer, H.: Anwendung des Stichprobenverfahrens beim Beurteilen von Fernsprechverkehrshemmungen. Arch. elektr. Übertragung **8** (1954) 439 bis 446
- [8] Meßgeräte für Verkehrs- und Betriebsbeobachtung in Fernsprechanlagen. Siemens & Halske AG, Wernerwerk für Fernsprechtechnik, Berlin-München 1960
- [9] Gonschior, P. und Schwub, F.: Verkehrs- und Betriebsbeobachtung in Fernsprech-Wählanlagen. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 216 bis 218
- [10] Schmidt, R.: Aufgaben und Einrichtungen des technischen Betriebsbüros. Fernmeldepraxis **37** (1960) 854 bis 863 und 928 bis 941; **38** (1961) 17 bis 40

Das Sennar-Burri-Projekt

Zur Energieversorgung der Republik Sudan

VON RUDOLF BURGER UND GERD LOTTES

Mit dem Bau des fast 3 km langen Staudammes bei Sennar am Blauen Nil – etwa 280 km südlich von Khartum (Sudan) – wurde vor mehr als 35 Jahren die Voraussetzung zum Bewässern der ausgedehnten Baumwollplantagen in der Gezira* und damit die Grundlage für die heutige Haupteinnahmequelle des Sudans geschaffen. Um das gestaute Wasser künftig auch zur Erzeugung elektrischer Energie ausnutzen zu können, wird gegenwärtig am Staudamm bei Sennar ein Wasserkraftwerk (Nennleistung 18,8 MVA) errichtet. Dieses Wasserkraftwerk wird das umliegende Gebiet (Gezira) mit elektrischer Energie versorgen und außerdem über eine 110-kV-Freileitung mit dem Dampfkraftwerk Burri in Khartum verbunden sein (Bild 1). Damit ist der Anfang einer verbundähnlichen Landesstromversorgung gemacht, die entscheidend zur weiteren wirtschaftlichen Entwicklung des Sudans beitragen wird.

Bisherige Stromversorgung des Landes

Unter der Leitung des Ministry of Works sind in den verschiedenen Provinzstädten Dieselmotorkraftwerke in Betrieb, u. a. in Port Sudan, Atbara, Wadi Halfa, El Obeid, Kosti, Kassala, Malakal und Juba. Einem elektrischen Zusammenschluß dieser Inselsysteme stehen, wie in den meisten Entwicklungsländern, einerseits die großen Entfernungen und andererseits der verhältnismäßig geringe Leistungsbedarf entgegen.

Günstiger liegen die Verhältnisse in der Landeshauptstadt Khartum und in der südlich davon gelegenen Gezira. Hier ist die Central Electricity & Water Administration (CEWA) für die Stromversorgung verantwortlich. Die Gesellschaft ist aus der 1925 von mehreren britischen Firmen gegründeten Sudan Light & Power Co. entstanden und 1956, als die Republik Sudan als selbständiger Staat gegründet wurde, in Staatsbesitz übergegangen.

Die CEWA betreibt das Kraftwerk Burri in Khartum sowie ein Dieselmotorkraftwerk in Wad Medani (etwa 4,5 MW). Im Kraftwerk Burri sind einige z. T. ältere Dieselmotorsätze mit zusammen etwa 10 MW, zwei 5-MW-Dampfmaschinen und ein 10-MW-Turbosatz mit ölgefeuerten Kesseln installiert. Die Verteilungsspannung in Khartum

beträgt 11 kV, die Verbraucherspannung 415/240 V. Dem Verteilungsnetz ist ein 33-kV-System – teils Kabel, teils Freileitungen – überlagert, das die drei Stadtteile Khartum, Khartum-Nord (Industriegebiet) und Omdurman verbindet.



Bild 1 Lage der bestehenden und der möglichen Staustufen in der Republik Sudan

* Gezira: Gebiet südlich von Khartum zwischen dem Weißen und dem Blauen Nil, eines der größten zusammenhängenden Baumwollanbaugebiete der Erde.



Bild 2 Staumauer bei Sennar (von Westen) vor Beginn des Kraftwerkbaues

Vorgeschichte des Sennar-Burri-Projektes und Auftragserteilung

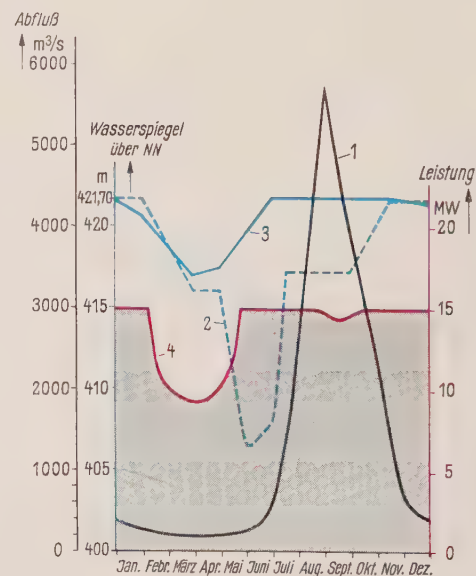
Schon 1956 haben die Siemens-Schuckertwerke Studien über die Wasserkraftnutzung im Sudan angestellt. Dabei ergab sich, daß der Hauptnil nördlich von Khartum günstige Möglichkeiten für den Bau großer Wasserkraftwerke bietet. Für den Anfang war aber der Bau eines Kraftwerkes an der bereits vorhandenen Staumauer von Sennar (Bild 2) am Blauen Nil vor allem wegen der günstigen Lage im wichtigen Wirtschaftsgebiet der Gezira vorzuziehen. Der Wasserhaushalt des Sennar-Stausees wird durch zwei Forderungen bestimmt:

1. Zum Bewässern der Baumwollfelder im Gezira-Gebiet muß die erforderliche Wassermenge zur richtigen Zeit verfügbar sein.
2. Unterhalb der Talsperre muß der Fluß genügend Wasser führen, damit die am Blauen Nil bis Khartum liegenden Pumpstationen sicher betrieben und die mit Ägypten (VAR) vertraglich festgelegten Wassermengen dem Hauptnil zufließen können.

Der Oberwasserspiegel wurde bisher so reguliert, daß der Stausee im Juni fast völlig entleert ist (s. Bild 3). Um eine wirtschaftliche Energieerzeugung zu ermöglichen, wurde eine neue Art der Bewirtschaftung des Stausees vorgeschlagen, die sowohl die erwähnten Forderungen erfüllt als auch genügend Wasser und ausreichende Fallhöhen für den Kraftwerkbetrieb gewährleistet.

Langwierige Berechnungen ergaben die in Bild 3 eingetragene mittlere jährliche Energiemenge von 114 Millionen kWh bei einer Kraftwerkleistung von

$2 \times 7,5 \text{ MW} = 15 \text{ MW}$; Voraussetzung hierfür ist eine grundlegend geänderte Bewegung des Wasserspiegels. Auf dieser Basis entstand der erste Entwurf für ein Wasserkraftwerk in Sennar mit einer 110-kV-Verbindung nach Khartum. Als Gutachter für das Projekt verpflichtete die sudanesisische Regierung die beiden Ingenieurfirmen Gebr. Gruner, Basel, und Société Générale pour



1 Natürlicher Wasserabfluß
2 Oberwasserspiegel bisher
3 Oberwasserspiegel, Vorschlag 1957
4 Verfügbare elektrische Leistung

Bild 3 Wassermengen, Wasserstände und erzeugbare elektrische Leistung in Sennar im Verlauf eines Jahres

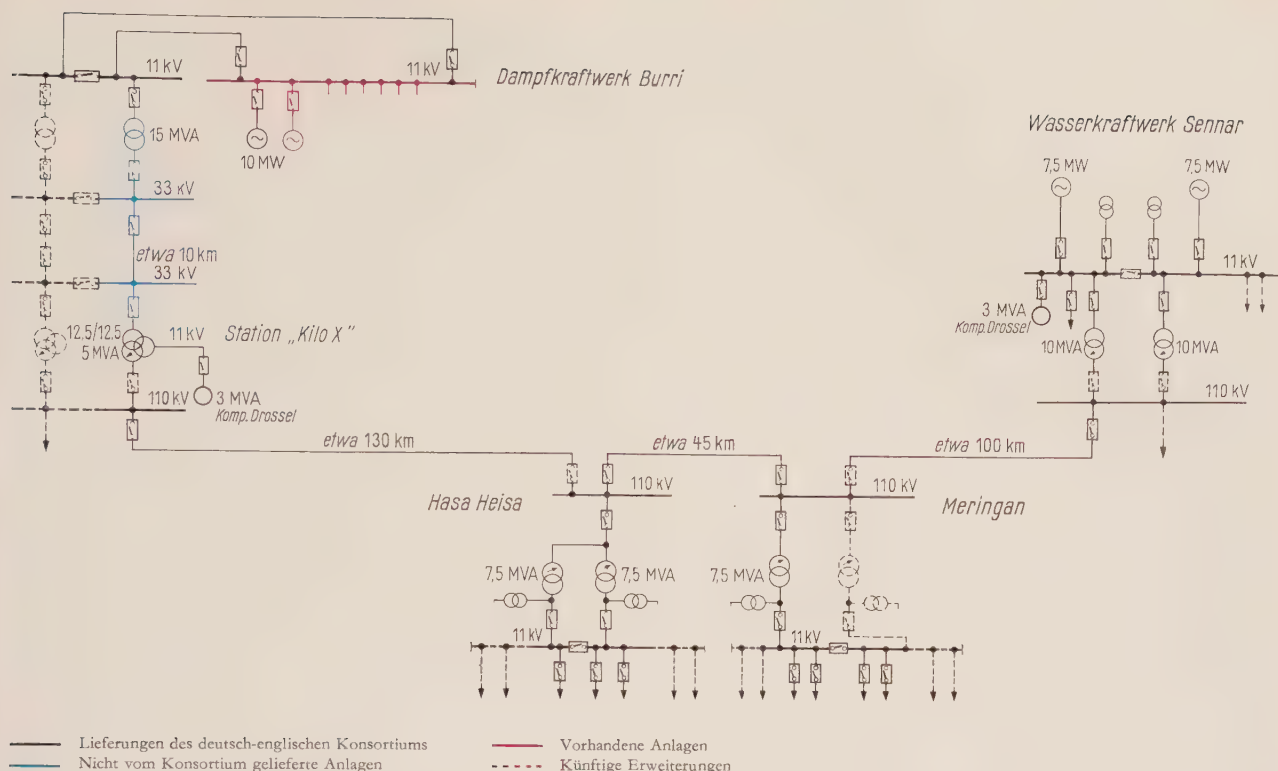


Bild 4 Elektrische Schaltung des Verbundsystems Sennar – Burri

l'Industrie, Genf, die die Wirtschaftlichkeit und Durchführbarkeit des Projektes bestätigten. Die sudanesishe Regierung beauftragte daraufhin ein deutsch-englisches Firmenkonsortium unter Federführung der English Electric Co. Ltd. und der Siemens-Schuckertwerke mit der Verwirklichung des Projektes. Die Bauarbeiten führt die Sennar-Civil-Engineering Group aus, die aus den Firmen Siemens-Bauunion GmbH, J. Berger AG und Ph. Holzmann AG besteht.

Der im Juni 1959 mit der sudanesischen Regierung geschlossene Hauptvertrag umfaßt den Bau folgender Anlagen (s. Bild 4):

Wasserkraftwerk Sennar mit zwei Maschinensätzen (je 7,5 MW, 136 U/min) und Aufspannstation, Erweiterung des Dampfkraftwerks Burri um einen 10-MW-Dampfturbosatz, 110-kV-Freileitung zwischen Sennar und Khartum, drei 110-kV-Umspannstationen (»Kilo X«, Hasa Heisa und Meringan).

Die Siemens-Schuckertwerke liefern:

für das Wasserkraftwerk Sennar zwei Generatoren sowie die elektrischen Einrichtungen, ausgenommen die 11-kV-Schaltanlage und den Notstrom-Dieselsatz, für die 110-kV-Stationen alle Haupt- und Hilfstransformatoren, zwei Kompensationsdrosseln sowie die Trennschalter und Überspannungsableiter, für die 110-kV-Leitung sämtliche Langstabisolatoren (etwa 4200).

Von Unterlieferanten der Siemens-Schuckertwerke werden für das Kraftwerk Sennar die Ein- und Auslaufausrüstungen und der Maschinenhauskran geliefert sowie für die Freileitung etwa 1100 Tragmaste.

Wasserkraftwerk Sennar

Der Mittelteil der vorhandenen Staumauer Sennar (s. Bild 2) wird auf einer Länge von etwa 600 m zum Abführen des Hochwassers benutzt. Das Kraftwerk läßt sich daher nur an einem der beiden Ufer anordnen. Mit Rücksicht auf die Führung der Freileitungen und die Erschließung der Baustelle fiel die Wahl auf das Westufer des Flusses.

Die Staumauer wird als Straßen- und Eisenbahn-Überführung benutzt und ist ein wichtiger Verkehrsweg. Bauarbeiten an der Mauer – unter Aufrechterhaltung des Verkehrs – sind schwierig und mußten möglichst vermieden werden. Deshalb wurde das Kraftwerk an die Unterwasserseite der Mauer gelegt, und zwar unmittelbar im Anschluß an diese (Bild 5a).

Im Verlauf der Projektierung kamen Bedenken hinsichtlich der Standsicherheit und der inneren Festigkeit des bestehenden Bruchsteinmauerwerks der Staumauer auf. Es wurde deshalb erwogen, Stauwerk und Krafthaus zu trennen und mit einer Rohrleitung zu verbinden (Bild 5b). Gegenüber der ersten Lösung wären jedoch bei dieser Anordnung bedeutende Mehrkosten bei schlechterer Re-

gelbarkeit der Maschinen entstanden. Daher wurde schließlich die erste Lösung beibehalten, allerdings mit der Bedingung, daß beim Felsaushub in der Nähe der Talsperre kein Sprengstoff verwendet werden darf.

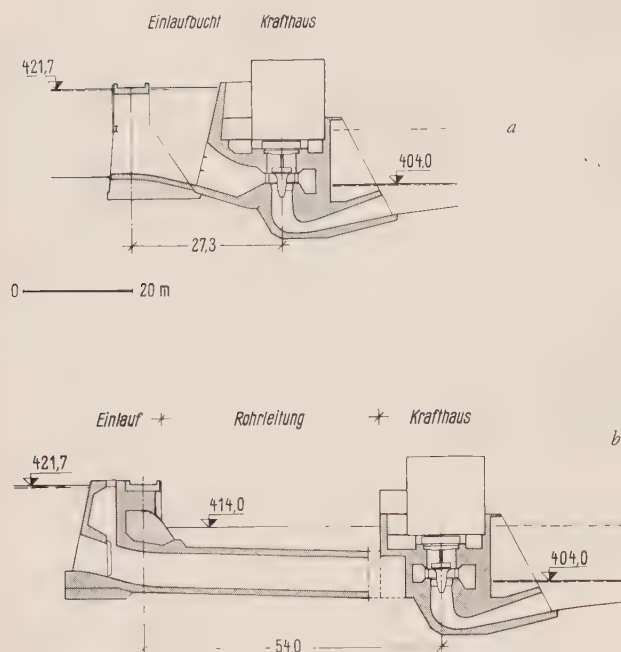


Bild 5 Tatsächliche (a) und erwogene Ausführung (b) des Wasserkraftwerks Sennar

Die bestehende Staumauer wird auf einer Länge von ungefähr 30 m abgebrochen und durch eine Brückenkonstruktion ersetzt. Zwei mit dem Krafthaus verbundene Stahlbetonwände bilden, in Verlängerung der Brückenwiderlager, die seitlichen Abschlüsse der Einlaufbucht. Das Wasser strömt durch einen Rechen in die Einlauf-

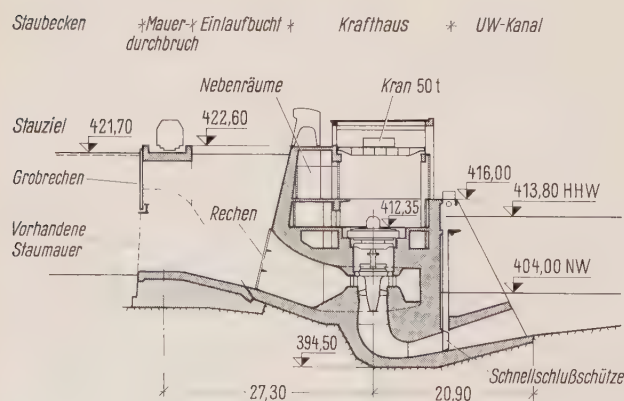


Bild 6 Querschnitt durch die Wasserkraftanlage Sennar

spiralen der beiden Kaplan турbinen und wird durch die Saugschläuche dem Unterwasserkanal und dem Flußlauf wieder zugeführt. Vor dem Rechen können Dammtafeln als Notverschlüsse eingesetzt werden. Für die Saugschläuche wurden Schnellschluß-Schütze mit elektrischem Antrieb vorgesehen. Diese Lösung ist preisgünstiger als andere mit ähnlicher Betriebssicherheit.

Im massiven Tiefbaubeton befinden sich an Betriebsräumen lediglich die Zugänge zu den Saugschläuchen sowie getrennte Pumpenanlagen für die Entwässerung des Krafthauses und die Entleerung der Turbinen. Die erste durchgehende Ebene auf Kote NN + 409,60 m bietet Gelegenheit, rund um die Generatoren die Turbinenregler, das Generatorzubehör, die Erregerumformer usw. aufzustellen und unterhalb der Schaltanlagen Räume für Leistungs- und Steuerkabel anzuordnen.

Der Maschinenhausflur auf NN + 412,35 m, der nur von den beiden Ölzuführungsböcken der Maschinen überragt wird, ist gleichzeitig Bedienungsfur. In der oberwasserseitigen Wand der Maschinenhalle sind sowohl die Relais tafeln als auch die Steuertafeln für die Maschinen und abgehenden Leitungen untergebracht sowie die sonstigen für den Betrieb erforderlichen Instrumente. Eigenbedarfstafel, 11-kV-Schaltanlage und Batterie stehen in besonderen Räumen. In der Höhe des Einganges (NN + 416,00 m) werden anschließend an die Maschinenhalle Lager, Pumpen, sanitäre Anlagen und das Notstrom-Dieselaggregat untergebracht. Für Werkstatt und Büros ist ein Anbau vorgesehen.

Das Krafthaus erhält keine Klimaanlage, sondern lediglich eine Belüftungseinrichtung. Sie kann je nach der Außentemperatur wahlweise auf Umluftbetrieb innerhalb des Gebäudes oder auf Einblasen von Frischluft geschaltet werden. Wegen des teilweise starken Sandgehaltes der Luft sind dem Hauptlüfter (Durchsatz etwa 36000 m³/Std) ein Grobfilter und ein umlaufendes Ölfilter zugeordnet. Die einzelnen Räume werden durch wahlweises Zuschalten einzelner kleiner Lüfter versorgt.

Eine Besonderheit ist das Dammtafellager zwischen der Westwand der Einlaufbucht und dem Bürogebäude. In vier Geschossen werden hier 24 Dammbalken von je 4,2 t gelagert, die durch die Rechenreinigungsmaschine aufgenommen und an ihren Einsatzort gebracht werden können.

Jeder der beiden Maschinensätze besteht aus einer Kaplan turbine mit vier Laufradschaufeln (Nenndrehzahl 136,4 U/min) und einem Drehstrom-Synchrongenerator, Bauform W 8, d. h. mit senkrechter Welle und kombinier tem Trag- und Führungslager am unteren Armstern.

Hauptdaten einer Turbine:

Fallhöhe	5,8	10	13	17	m
Durchfluß	91,4	91,4	67,8	52,5	m ³ /s
Leistung	4800	10600	10600	10600	PS

Hauptdaten eines Generators:

Nennleistung	9,4 MVA
Nenn-cos φ	0,8
Nennspannung	11 kV \pm 5%
Durchgangsdrehzahl	425 U/min
Leerlauf-Kurzschluß-Verhältnis	1,1
Läuferschwingmoment	822 tm ²

Die Generatorspannung wird durch Magnetregler geregelt. Der Magnetregler und der Antriebsmotor des Erregerumformers werden von einem Konstantspannungs-Wellengenerator gespeist.

Die örtlichen Gegebenheiten wirkten sich mehr als bei anderen Wasserkraftwerken auf den Terminplan aus, wodurch wiederum einzelne Konstruktionselemente maßgebend beeinflußt wurden. Der Blaue Nil führt z. B. zu genau bekannten Zeiten Hochwasser; dabei steigt der Wasserspiegel unterhalb der Staumauer um etwa 10 m gegenüber Normalwasser. Gegen dieses Hochwasser wird die Krafthausbaugrube während der Bauzeit durch einen Erddamm mit Kerndichtung aus Ziegelmauerwerk geschützt.

Auf der Oberwasserseite ist eine Baugrubenumschließung bis über den höchstmöglichen Wasserspiegel mit wirtschaftlich tragbarem Aufwand nicht ausführbar. Man entschloß sich daher, eine einfache Spundwand mit der Oberkante NN+ 417,50 m zu errichten, die zunächst gegen die bestehende Mauer und, nach deren teilweisem Abbruch, gegen das Krafthaus abgestützt wird. Hierfür sind sehr schwere Stahlteile erforderlich. Aufgrund der festgelegten Spundwandoberkante sind die Arbeiten am Ein-

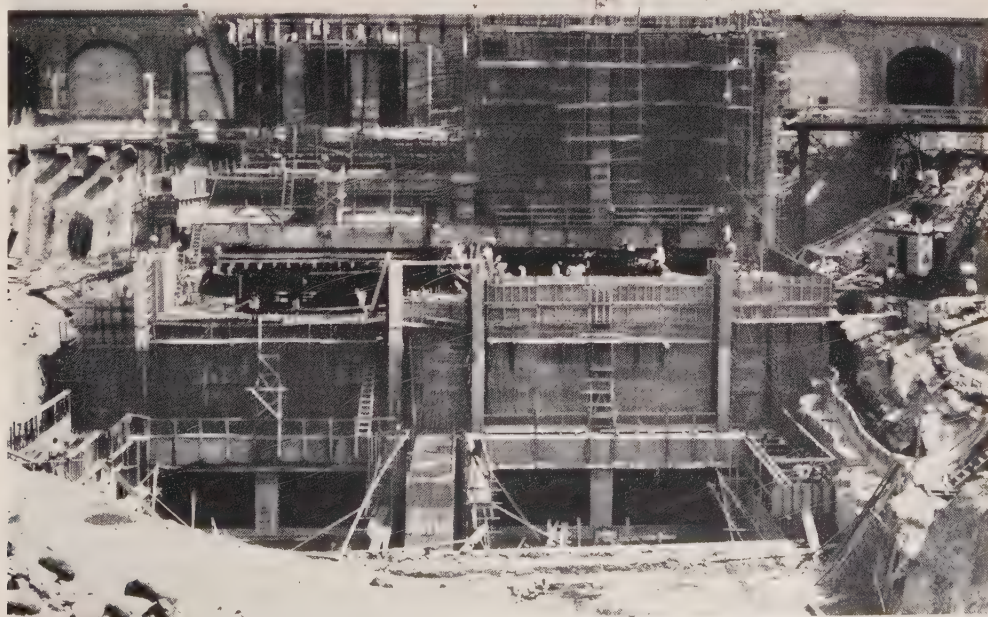
lauf jeweils an eine Absenkungsperiode von 6 Monaten gebunden (s. Bild 3).

Das Staubecken von Sennar ist z. Z. der einzige große Wasserspeicher für das Gezira-Gebiet und darf nicht infolge etwaiger Schäden während der Bauzeit leerlaufen. Die Abbrucharbeiten am Damm werden deshalb erst dann beginnen, wenn das Krafthaus so weit fertiggestellt ist, daß es bei einem Bruch der Spundwand dem Wasserdruck standhalten kann. Damit sind aber sowohl die Arbeiten am Kraftwerk als auch die Abbrucharbeiten am Damm vom Stand des Oberwassers abhängig.

Die konstruktive Grundkonzeption wurde durch diese Umstände insofern beeinflußt, als eine Möglichkeit gefunden werden mußte, die Seitenwände der Einlaufbucht schon vor dem Beginn der Arbeiten an der Staumauer dicht an diese anzuschließen. Die Seitenwände wurden aus diesem Grund in den Kraftwerkskörper eingespannt und verursachen dort zusätzliche Zug- und Druckkräfte. An der Berührungsfläche mit der Staumauer sind Kunststoff-Fugenbänder als Dichtung eingelegt.

Die ersten Arbeiten in Sennar waren dadurch erschwert, daß in der Nähe der Staumauer kein Sprengstoff verwendet werden darf. Der Felsaushub in der engen Baugrube (feinkörniger Gneis) erforderte viel Mühe; dabei fielen weit mehr Aushubmassen in Form von dichtgelagertem Gestein an, als man erwartet hatte. Wegen der vielfältigen Abhängigkeit der einzelnen Bau- und Montagearbeiten voneinander und wegen des Einflusses der örtlichen Gegebenheiten war es erforderlich, das Bauprogramm zu ändern. Der Fertigstellungstermin wird sich aber trotzdem nicht wesentlich verschieben.

Bild 7 Baustelle
Wasserkraftwerk Sennar
im Frühjahr 1961



Während in Sennar die Bauarbeiten z. Z. noch im Gange sind (Bild 7), wurden andere Teile der Gesamtlieferung bereits in Betrieb genommen.

Unterstationen

Die Montage der Unterstationen verlief ohne Schwierigkeiten. Als Besonderheit ist lediglich der Transport der Transformatoren von den Entladebahnhöfen zum Aufstellungsort zu erwähnen. Nach sorgfältiger Vorbereitung verlief der Transport der 30 t schweren Umspanner mit Tiefladern trotz teilweise schlechter Wegverhältnisse ohne Zwischenfälle.

110-kV-Freileitung

Der Grundsatz, daß jedes Mitglied des Firmenkonsortiums das von ihm gelieferte Material selbst montiert, konnte bei der 110-kV-Freileitung nicht eingehalten werden. Vor allem wirtschaftliche Gründe gaben den Ausschlag für eine Arbeitsteilung, wobei die Siemens-Schuckertwerke die Gründungsarbeiten und die Montage der Masten übernahmen. Die Seilzugarbeiten wurden von der British Insulated Callender's Construction, einem Unterlieferanten der English Electric, ausgeführt.

Ein besonderes Problem beim Bau jeder Freileitung sind die Mastfundamente. Unter den verschiedenen Möglichkeiten wurde ein aufgelöstes Fundament gewählt, bei dem jeder Mast vier Einzelfundamente hat. Die Mastfüße wurden zunächst an zentraler Stelle mit einem prismatischen Betonkörper quadratischen Querschnitts umgeben und diese vorgefertigten Fundamenteile am jeweiligen Maststandort in einen unteren Fundamentklotz einbetoniert. Die gewählte Ausführung brachte folgende Vorteile:

Gleichbleibend gute Betonqualität der vorgefertigten Teile und gute Überwachungsmöglichkeit bei deren Herstellung. Einfache Lösung des Schalungsproblems für die Betonkörper, da die Schalung nach dem Rütteln auf dem Rütteltisch sofort wieder entfernt werden konnte. Große Sicherheit gegenüber Zug- und Druckkräften durch direktes Anbetonieren des unteren Fundamentklotzes an das gewachsene Erdreich.

Die Fundamentarbeiten wurden von einer örtlichen Bau-firma im Auftrag der Siemens-Schuckertwerke ausgeführt.

Vor der Freigabe der 1100 Tragmaste zur Fertigung wurde Ende Oktober 1959 ein Mast einem Umbruchversuch unterworfen. Gleichzeitig hat man Belastungsversuche an Fundamenten vorgenommen. Beide Prüfungen hatten gute Ergebnisse.

Im Hinblick auf den langen Transportweg – allein die Eisenbahnstrecke innerhalb des Sudans ist mehr als 1000 km lang – mußte man der Verpackung der Langstabisolatoren besondere Beachtung schenken. Die ge-



Bild 8 Tragmast während der Montage. Für die 110-kV-Leitung Sennar-Burri wurden etwa 1100 Tragmaste und etwa 100 Winkel- und Abspannmaste aufgestellt

wählte Einzelverpackung in dickem Wellpappkarton hat sich gut bewährt. Die Schadensquote lag unter 1%.

Aufgrund des guten Verhältnisses zum Kunden und den beratenden Ingenieuren und deren verständnisvoller Mitarbeit sowie dank der Leistungen der sudanesischen Arbeitskräfte gingen die eigentlichen Montagearbeiten gut voran (Bild 8), so daß das erste Teilstück der Leitung von Khartum bis Meringan einschließlich der Unterstationen »Kilo X«, Hasa Heisa und Meringan zugleich mit dem neuen Maschinensatz im Dampfkraftwerk Burri programmgemäß im März 1961 – also etwa 20 Monate nach Vertragsunterzeichnung – in Betrieb gehen konnte

Künftige Entwicklung

Es bringt ein gewisses Risiko mit sich, den Anbau der Baumwolle als wichtigster Devisenquelle des Sudans in Monokultur zu betreiben. Durch Schädlingsbefall verursachte Mißernten und andere Gründe können zu empfindlichen wirtschaftlichen Störungen Anlaß geben. Man ist daher bestrebt, auch andere landwirtschaftliche Produkte, z. B. Zuckerrohr, anzubauen und Industrien anzusiedeln. Außer dem derzeitigen Strombedarf für die Baumwollentkernung in der Gezira und für den Antrieb von Pumpstationen wird dann elektrische Energie für

diese neuen Wirtschaftszweige und für die sich ausbreitende öffentliche Versorgung benötigt. Die jährliche Zunahme des Bedarfes an elektrischer Energie wird deshalb innerhalb der nächsten Jahre voraussichtlich über dem Normalmittel von 7% liegen.

In abseits gelegenen Städten werden auch künftig Diesel- oder Dampfkraftwerke errichtet werden. Da im Sudan aber weder Kohle noch Öl als Brennstoff für thermische Kraftwerke vorkommen, müssen die Kosten hierfür in Devisen aufgebracht werden. Die reinen Brennstoffkosten z. B. für eine im Dampfkraftwerk Burri erzeugte Kilowattstunde betragen umgerechnet etwa 6 Pf. Es liegt daher nahe, für den weiteren Ausbau der Landesstromversorgung in erster Linie Wasserkraft heran-zuziehen, besonders die des Nils. Die einzelnen Abschnitte des Nils weisen folgende jährliche Rohenergien auf:

Blauer Nil	
von der Landesgrenze bis Khartum	$13 \cdot 10^9$ kWh
Weißer Nil	
von der Landesgrenze bis Khartum	$12,5 \cdot 10^9$ kWh
Nil von Khartum bis Wadi Halfa	$37 \cdot 10^9$ kWh

Auch wenn nur ein Teil der vorhandenen natürlichen Wasserkraft genutzt wird, läßt sich ein großer Teil des Bedarfes an elektrischer Energie auf lange Zeit decken. Berücksichtigt man noch, daß zur Bewässerung und Flußregulierung ohnehin Talsperren gebaut werden müssen, so erhält man die aus Wasserkraft gewonnene elektrische Energie zu verhältnismäßig wirtschaftlichen Bedingungen.

Folgende Projekte sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen:

Am Sennardamm kann ein zweites Kraftwerk errichtet werden. Es läßt sich vor allem dann wirtschaft-

lich ausnutzen, wenn die vorgeschlagene neue Regelung des Stauspiegels eingeführt wird (vgl. Bild 3). Die geplante Talsperre Roseires – etwa 300 km oberhalb von Sennar gelegen – wird sich auf den Niederwasserspiegel im Staubecken Sennar während der Monate März bis Mai besonders günstig auswirken. Die Vorarbeiten für den Bau dieser Staumauer haben bereits begonnen. Obwohl dieser Speicher vor allem zur Bewässerung angelegt wird, ist auch dort die spätere Errichtung eines Wasserkraftwerkes geplant.

Am Weißen Nil, etwa 50 km oberhalb von Khartum, befindet sich der Gebel-Aulia-Damm (s. Bild 1). Ein Kraftwerk an dieser Talsperre würde wegen der unterschiedlichen Abflußverhältnisse des Weißen und des Blauen Nils das Kraftwerk in Sennar vorteilhaft ergänzen.

Durch den Rückstau des großen Hochdammes bei Sad el Ali in Ägypten wird im Sudan das Gebiet bei Wadi Halfa überflutet. Die dort lebenden Menschen sollen am Atbara-Fluß eine neue Heimat finden. Zur Bewässerung neuer Ländereien wurde deshalb mit dem Bau der Staumauer von Khashm el Girba begonnen. Auch dieses Projekt schließt die Errichtung eines Wasserkraftwerkes zur Lieferung von Energie für Pumpbewässerungen und für die örtliche Stromversorgung ein.

Das größte wirtschaftlich nutzbare Wasserkraftvorkommen im Sudan bietet der Nil nördlich von Khartum. Es wird aber erst in der fernen Zukunft Bedeutung erlangen. Auf einer Flußstrecke von 1250 km Länge – bis zum Rückstau von Sad el Ali – kann man mindestens 1 Million PS an Kraftwerksleistung installieren, wobei große Speicherbecken eine dem Bedarf entsprechende Erzeugung ermöglichen.

Lochstreifengeräte für Sonderzwecke

VON ERICH LÖLKES UND SVEN VOELCKER

Bei der Übertragung telegrafischer Nachrichten ist es häufig zweckmäßig, den Nachrichteninhalt für einige Zeit zu speichern, um durch geeigneten Abruf aus dem Speicher die Nachricht mit höchstmöglicher Geschwindigkeit über eine Leitung geben zu können und um Lücken im Nachrichtenfluß zu vermeiden. Als Speicher bietet sich hier der Papierstreifen an, in den der Nachrichteninhalt in Gestalt von verschiedenartig angeordneten Lochungen eingestanz wird.

Der geringe Preis des Lochstreifens, seine Standfestigkeit und ganz besonders seine vielseitige Verwendbarkeit sowie die Tatsache, daß die gelochten Kombinationen gut erkennbar sind, haben schon sehr bald nach seiner Einführung in den Telegrafienbetrieb dazu geführt, daß er auch auf ganz anderen Gebieten in ständig zunehmendem Maße verwendet wird.

Lochstreifengeräte können verschiedene Aufgaben haben. Sie sollen entweder Nachrichten in einen Streifen

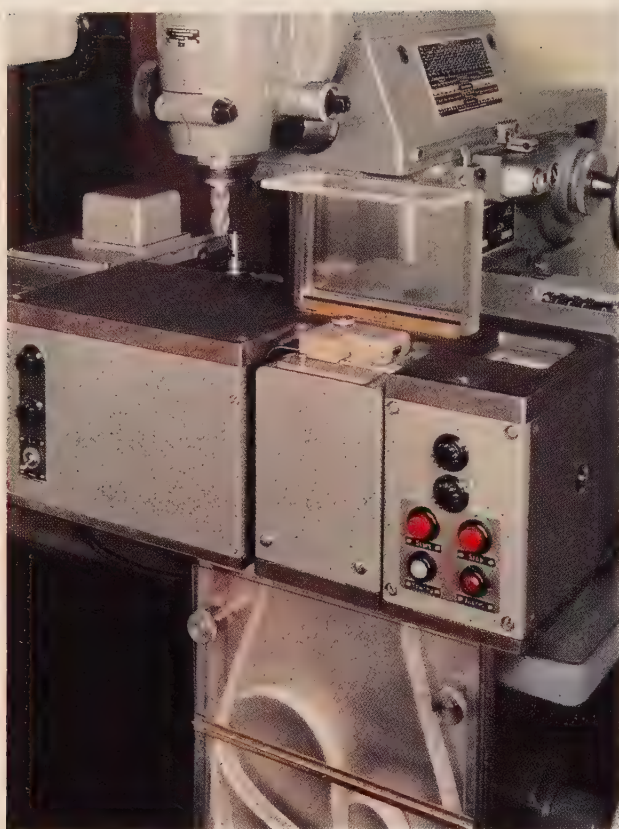


Bild 1 Lochstreifen-Abtaster zum Steuern einer Fräsmaschine

nungen zunehmend als Speichergeräte an Bedeutung gewinnen.

Die Arbeitsweise einiger solcher von Siemens & Halske entwickelter Geräte wird im folgenden geschildert, die Möglichkeiten ihrer besonderen Anwendung werden aufgezeigt.

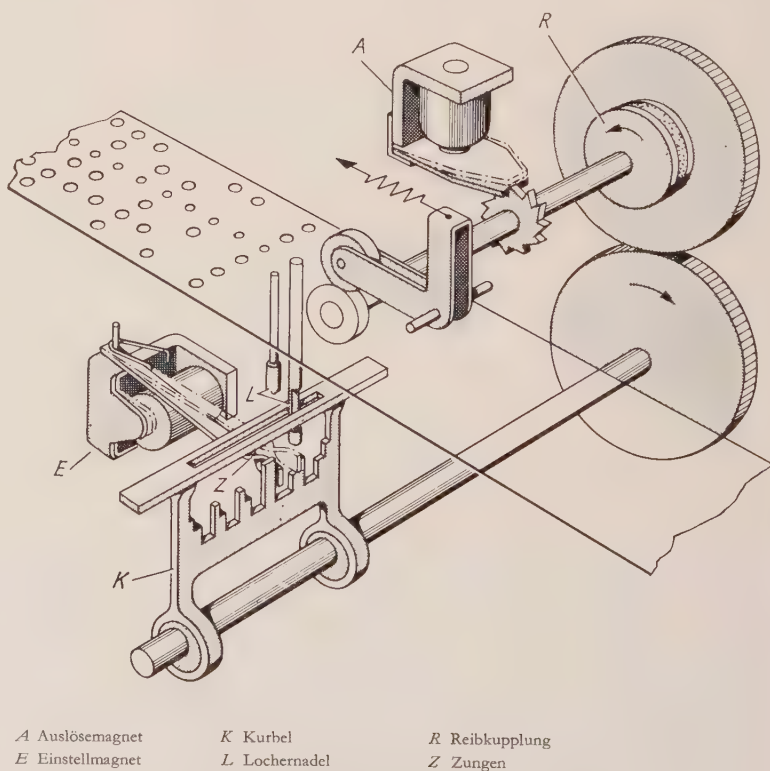
Arbeitsweise

Locher mit Paralleleingang

Die Zeichenkombinationen werden durchweg mit Hilfe von vorgewählten Lochernadeln und einer Matrize in den Papierstreifen gelocht. Zum Antrieb des Lochers dienen Exzenter und Kurbel (Bild 2) oder Nockenscheiben und Schieber. Die zu betätigenden Lochernadeln werden über Zungen ausgewählt, die längs oder quer zur Bandlaufrichtung zwischen Betätigungsorgan und Nadel eingeschoben sind. Die Einstellung der Zungen ist von einem vorgeschalteten Zeichenspeicher abhängig, der elektrisch oder mechanisch arbeiten kann.

Bei einem Handlocher, mit dem unabhängig von einer Fernschreibmaschine Lochstreifen hergestellt werden können, dient zum Auslösen der Nockenwelle eine Zahnkupplung, die von jeder angeschlagenen Taste nach Einstellen der Locherzungen für je eine Umdrehung freigegeben wird. Im elektrisch angesteuerten Streifenlocher 17 [1] wird die Zahnkupplung über einen Magneten durch den Auslöseimpuls zum Einrasten gebracht, der gleichzeitig mit den Einstellimpulsen eintrifft.

lochen oder Nachrichten, die in Form eines Lochstreifens vorliegen, abtasten. Zum Lochen der Nachricht sind verschiedenartige Geräte notwendig, je nachdem, ob die Nachricht vom Originaltext mit Hilfe einer Tastatur übernommen oder am Ende einer Fernschreibleitung vom Empfangsgerät reproduziert werden soll. Geräte, die in Form von Lochstreifen vorliegende Nachrichten abtasten und weitersenden, werden als Abtaster bezeichnet. In der Regel werden die Zeichen als Serienzeichen verarbeitet. Für Geräte, die Paralleleingang oder -ausgang haben, aber Serienzeichen verarbeiten sollen, kommen zu den beiden eben erwähnten Hauptgruppen der Lochstreifengeräte noch folgende Geräte hinzu: der Empfangsumsetzer (Serien-Parallel-Umsetzer) zum Locher und der Sendeverteiler (Parallel-Serien-Umsetzer) zum Abtaster. Eine weitere wesentliche Gruppe sind die Kombinationen »Locher-Abtaster« (Lochstreifen-Über-träger), die in zahlreichen Anord-



A Auslösemagnet K Kurbel R Reibkupplung
E Einstellmagnet L Lochernadel Z Zungen

Bild 2 Wirkungsweise eines Streifenlochers

Bei Lochern, die an normale Fernschreibgeräte angebaut werden können, wird zum Auslösen des Lochvorgangs die Zahnkupplung des Druckers mitbenutzt.

Geräte, deren Geschwindigkeit die Anwendung eines Kuppelvorganges ausschließt, wie es z. B. bei dem als Streifenlocher 22 bezeichneten Gerät der Fall ist, haben eine Locherwelle, die ständig umläuft. Die Lochung eines Zeichens wird hier durch die phasenrichtige Einstellung der Wählungen vom Anker der Einstellmagnete aus veranlaßt. Der darauffolgende Vorschub des Streifens wird ebenfalls durch einen Magneten für einen Schritt freigegeben.

Einstell- und Auslöseimpulse dürfen von außen nur einmal angeboten werden. Der ständige Durchlauf der Nockenwelle setzt eine Synchronisierung mit dem gebenden Gerät voraus. Hierfür ist im Locher eine induktive Abtastung der Stellung der Locherwelle vorgesehen.

Locher mit Serien-Parallel-Umsetzer und Speicher

Beim Parallelbetrieb kommen die Auslöse- und Einstellimpulse oder einzelne Schritte eines Zeichens zu gleicher Zeit auf je einer Leitung an. Im Gegensatz hierzu folgen beim Serieneingang die Auslöse- und Einstellimpulse zeitlich nacheinander auf einer einzigen Leitung. Dies ist in der Regel der Fall, wenn über Fernleitungen gearbeitet wird. Diese Betriebsweise bedingt bei Lochern der geschilderten Bauart vor den einzustellenden Locherzungen einen Umsetzer und einen Speicher, der das Zeichen festhält, bis das Umsetzen und Einstellen der Zungen beendet ist.

Das Umsetzen und Speichern geschieht bei den Fernschreibgeräten mechanisch. Der Linienstrom erregt im Rhythmus der ankommenden Zeichen einen Magneten. Ein oder mehrere Anker werden in regelmäßiger Folge diesem Magneten angeboten und kurz danach von Wählgliedern abgetastet. Die vom Anker je nach Leitungszustand während dieser Abtastung eingenommene Stellung wird von den Wählgliedern bis zum Ende des Zeichens gespeichert und dann für alle Schritte gleichzeitig an den Drucker und damit auch an die Locherzungen weitergegeben. Dort werden die Zeichen gespeichert, bis die Lochung beendet ist. An dieser Stelle ist es z. B. beim Lochstreifen-Empfänger 15 [2, 3] möglich, mit einer zusätzlichen Kontaktbaugruppe das Zeichen elektrisch abzufragen.

Eine besondere Ausführung des Lochstreifen-Empfängers 15 hat eine verbreiterte Papierbahn; diese ermöglicht es, Lochstreifenkarten (LSK) herzustellen, wie sie z. B. beim Siemens-Selex-

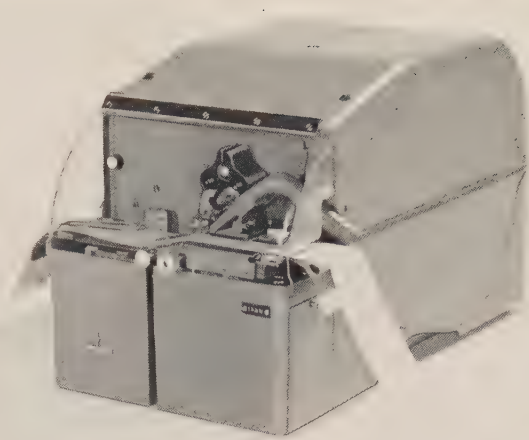


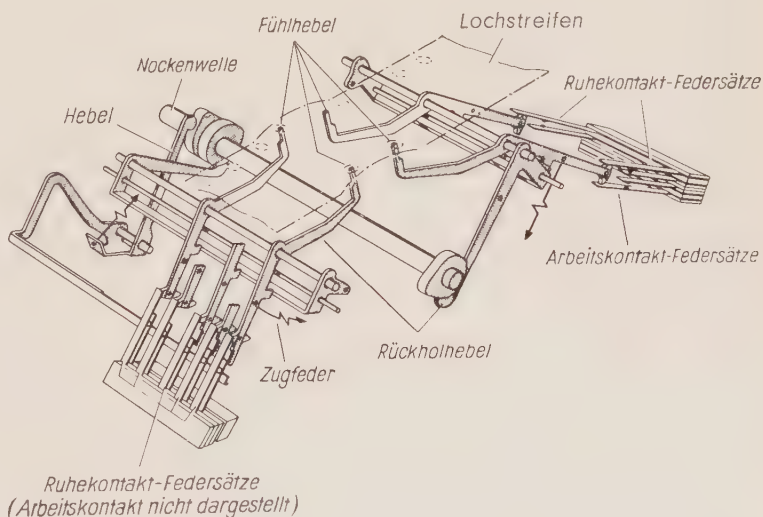
Bild 3 LSK-Locher 15 zur Herstellung von Lochstreifenkarten

Verfahren verwendet werden (Bild 3). Die wichtigsten Locher arbeiten mit folgenden Geschwindigkeiten:

Handlocher 12	15 Z/s
Streifenlocher 17	20 Z/s
Streifenlocher 22	60 Z/s (neuere Ausführung 100 Z/s)

Lochstreifen-Abtaster für Parallelbetrieb

Lochstreifen können auf verschiedene Weise abgetastet werden [4]. Die wichtigsten Formen sind mechanische Abtastung (wie z. B. beim Lochstreifen-Abtaster 77), elektrische Abtastung (wie beim Lochstreifen-Abtaster 91) und optische Abtastung (wie beim Lochstreifen-Leser 103).



Zweite Abtastung

Erste Abtastung

Bild 4 Wirkungsweise eines Lochstreifen-Abtasters

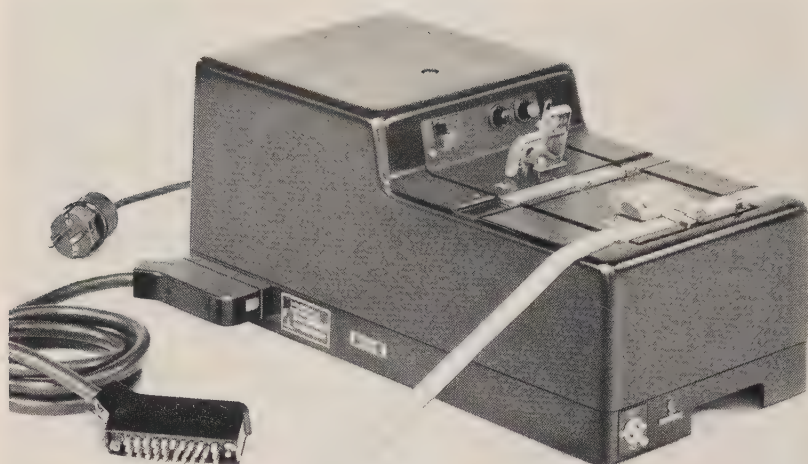


Bild 5 Lochstreifen-Abtaster 77

Bei allen diesen Abtastungen wird eine der Schrittzahl entsprechende Anzahl von Ausgangskontakten eingestellt.

Beim vielseitig verwendbaren Lochstreifen-Abtaster 77 (Bilder 4 und 5) betätigen die Abtasthebel direkt zwei Gruppen von Arbeits- und Ruhekontakten. Mit einer um eine Teilung versetzten zweiten Abtastung kann man die Zeichen durch Vergleich kontrollieren. Zwei Möglichkeiten bestehen auch für die Zeitpunkte der Abtastung: Bei einer Ausführung wird in der Ruhestellung, bei einer

anderen während des Umlaufes der Nockenwelle abgetastet.

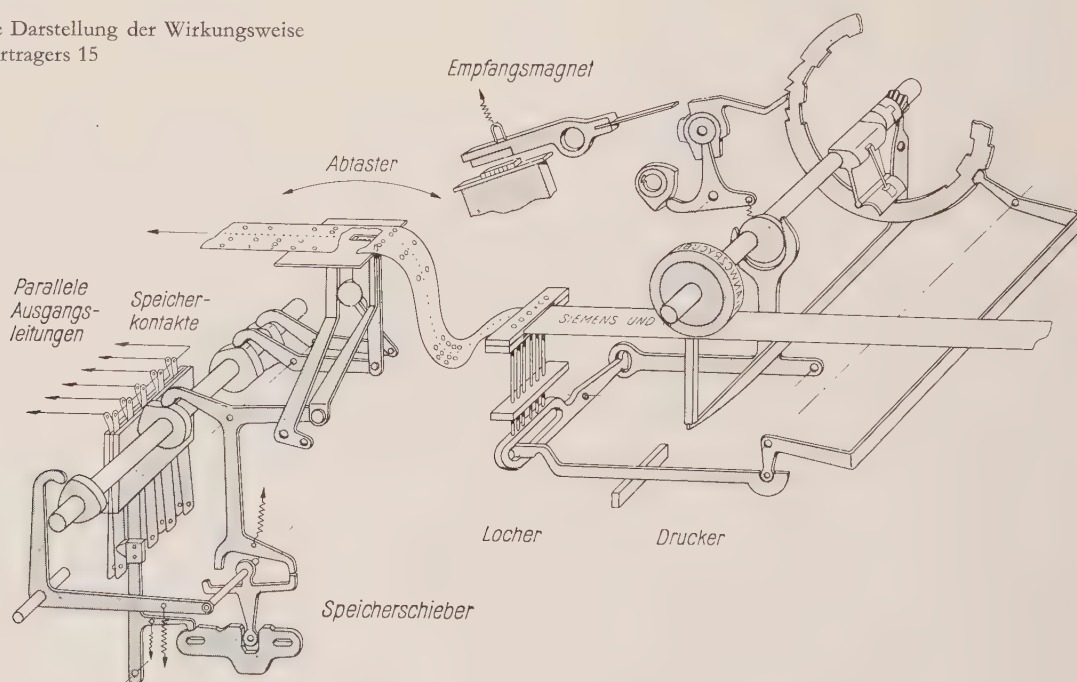
Zum Abtasten von Lochstreifenkarten gibt es eine weitere Ausführung mit besonders breiter Papierbahn. Ferner kann das Gerät auch für zwei Papierbahnen geliefert werden, die wahlweise für Lochstreifen, Lochstreifenkarten oder gemischt eingerichtet sein können.

Eine Sonderstellung nimmt die Abtasteinrichtung des Lochstreifen-Übertragers 15 ein (Bilder 6 und 7); diese klettert auf einem Schwenkhebel am Band entlang. Die Fühlhebel geben ihre Stellung über ein Gelenk und über Speicherschieber an Kontakte

weiter, deren Anzahl derjenigen der Zeichenschritte entspricht. Das Gelenk ist in der Drehmitte des erwähnten Schwenkhebels angeordnet.

Für hohe Geschwindigkeiten ist es nötig, den Aufwand an bewegten Teilen so klein wie möglich zu halten. Beim Einbauabtaster 91 (s. Bild 1), der bis zu 20 Z/s verarbeiten kann, wird deshalb der Streifen selbst zur Kontaktabgabe herangezogen; dazu sind als Kontaktfühler Drahtbürsten vorgesehen, die von ihrem Gegenkontakt durch den Streifen getrennt werden. Löcher im Streifen bewirken demnach Kontaktabgabe, wobei jeder Lochreihe

Bild 6 Schematische Darstellung der Wirkungsweise des Lochstreifen-Übertragers 15



ein Kontakt zugeordnet ist. Außerdem ist je eine zweite Kontakt- und Bürstenreihe für Kontrollzwecke eingebaut.

Wenn die Abtastgeschwindigkeit so hoch sein muß, daß selbst noch die geringen Reibungskräfte stören, die durch die Bürsten bedingt sind, so geht man zur optischen Abtastung über, wie es beim Lochstreifenleser 103 geschehen ist; dieser tastet mit Fotodioden ohne jeden Einfluß bewegter Massen ab. Die Abtastgeschwindigkeit ist nach oben vor allem durch die zulässige Zugbeanspruchung des Papierstreifens begrenzt, einen gewissen Einfluß üben jedoch auch die elektrischen Eigenschaften der Fotodioden und der nachgeschalteten Bauelemente aus.

Die Geschwindigkeiten der bisher genannten und mit reinem Parallelbetrieb arbeitenden Geräte sind:

Lochstreifen-Abtaster 77	20 Z/s
Lochstreifen-Abtaster 91	20 Z/s
Lochstreifen-Leser 103	400 Z/s

Abtaster mit Parallel-Serien-Umsetzer (Lochstreifen-Sender)

Die Lochstreifen-Sender sind in erster Linie für Übertragungsaufgaben bemessen; sie liefern die Abtastergebnisse als Serienzeichen auf die Leitung. Zu diesen Geräten gehören der Lochstreifen-Sender 61 und die Anbausender der Fernschreibgeräte. In diesem wird das abgetastete Zeichen zunächst in Fühlhebeln mechanisch gespeichert. Danach werden die Stellungen der Fühlhebel von den einzelnen Kontakthebeln nacheinander abgetastet und an je einen der Sendekontakte weitergegeben, die in fester Reihenfolge die Impulse auf die Leitung geben. Die Parallel-Serien-Umsetzung geschieht also rein mechanisch. Bei einigen Ausführungen ist es auch möglich, die Zeichen ohne zusätzlichen mechanischen Aufwand hinter dem Abtaster in Parallelform elektrisch abzugreifen und weiterzuleiten.

Lochstreifen-Übertrager

Die Hauptaufgabe eines Lochstreifen-Übertragers ist es, eine ankommende Nachricht zunächst zu speichern und sie zu einem späteren Zeitpunkt einmal oder wiederholt weiterzusenden. Im zweiten Fall wird die Nachricht gleichzeitig vom Sender gesendet und im mitlesenden Empfänger für jede Wiederholung erneut eingespeichert. Schließlich kann ein Lochstreifen-Übertrager auch zur Transformation der Telegrafiergeschwindigkeit, z. B. von 50 auf 75 Baud und umgekehrt, benutzt werden. Diese Aufgaben bedingen nur geringfügige Abweichungen in der Ausführung der Geräte. Lediglich die Art der Übertragung – Fernschreibzeichen auf fünf Leitungen parallel mit einer zusätzlichen Auslöseleitung oder auf einer Leitung in Serie – bedingt größere Abweichungen.

Für die beiden zuletzt erwähnten Betriebsarten gibt es je ein Grundgerät (Lochstreifen-Übertrager 15 und Lochstreifen-Übertrager 74). In jedem können bis zu etwa 10000 Zeichen gespeichert werden, was einer Speicherkapazität von maximal 25 min bei 50 Baud entspricht.

Der Lochstreifen-Übertrager 74 arbeitet auf der Eingangs- und der Ausgangsseite auf sechs parallele Leitungen. Ankommende Auslöse- und Einstellbefehle veranlassen die entsprechende Lochung des Bandes. Noch während des gleichen Nockenwellenumlaufes wird das Band auf richtige Lochung geprüft. Auch beim Aussenden wird zum Vergleich jedes Zeichen zweimal kurz hintereinander abgetastet. Bei etwaigen Abweichungen kann ein Signal gegeben werden.

Der Lochstreifen-Übertrager 15 (Bild 7) steht für den in der Praxis wichtigen Betrieb zur Verfügung, bei dem Serien-Fernschreibzeichen über eine Fernleitung zugeführt werden. Die ankommenden Zeichen werden nach der Auswertung parallel umgesetzt, gespeichert und in den Streifen gelocht. Während der Lochung wird das Zeichen an den Einstellgliedern gespeichert und kann dann gleichzeitig von fünf Kontaktsätzen abgegriffen werden. Die hinter der Lochvorrichtung entstehende Schlaufe des Papierstreifens (s. Bild 7) wird von einem kletternden Abtaster bis zum letzten Zeichen wieder abgetastet. Die abgelesenen Zeichen werden an fünf Kontaktfeder-sätzen in Form von Parallelzeichen eingestellt. Diese Einstellung bleibt bis unmittelbar vor dem Wechsel zum nächsten Zeichen bestehen. Ein nachgeschalteter

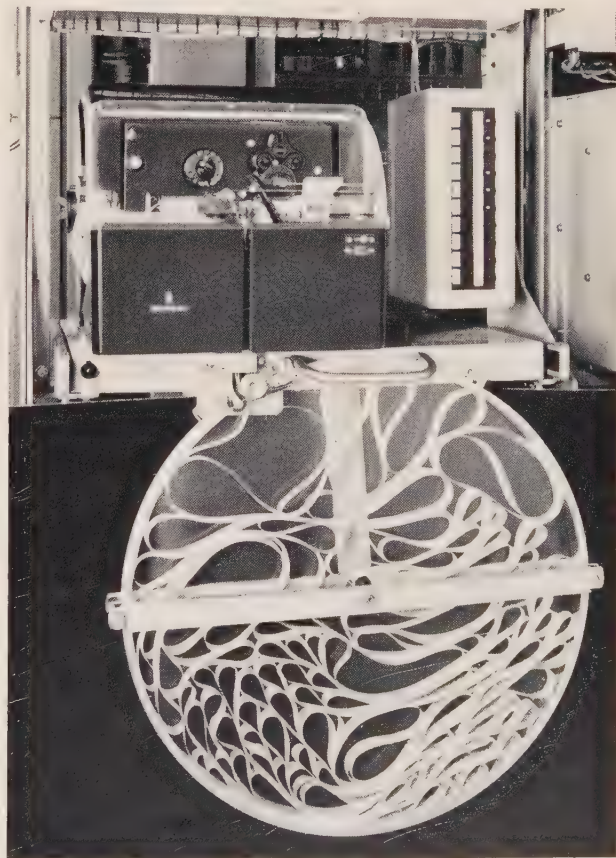


Bild 7 Lochstreifen-Übertrager 15 mit Speicherkassette

Parallel-Serien-Umsetzer kann die Zeichen entsprechend der Fernschreibgeschwindigkeit vom Abtaster abrufen. Es ist aber auch möglich, die Zeichen parallel weiterzuverwerten.

Das Gerät ist als Tischgerät ausgeführt, wird aber häufig in Schränke und Gestelle eingebaut (s. Bild 7), wie es für große Schaltzentralen zweckmäßig ist.

Beide Geräte gewährleisten ein hohes Maß an Sicherheit, wie es für den vollautomatischen Betrieb unbedingt erforderlich ist. Dazu sind Überwachungskontakte für Papiervorrat, Streifenvorschub, Papierende im Locher, Speicherschlaufenlänge, Füllungsgrad der Aufwickelspule, Papierende sowie für Motordrehzahl eingebaut.

Anwendungsbeispiele

Von den zahllosen Verwendungsmöglichkeiten für Lochstreifengeräte außerhalb der Nachrichten-Übertragungstechnik können hier nur einige besonders bemerkenswerte Beispiele beschrieben werden.

Registrierung von Meßwerten in einem Stahlwerk

Eine sehr häufige Anwendung ist das Registrieren von Meßreihen, die später automatisch ausgewertet werden sollen. Mit Hilfe einer Verteilereinrichtung, z. B. eines Wählers, kann eine größere Anzahl von Meßstellen in gleichmäßiger Folge abgefragt werden. Zweckmäßigerweise verwendet man Meßfühler, die so ausgebildet sind, daß sie den Meßwert bereits in codierter Form abgeben. Vom Verteiler muß dann meistens nur noch ein Auslöseimpuls hinzugefügt werden. Beim regelmäßigen Ansteuern der einzelnen Meßstellen braucht als Kennung des Ablaufes nur je eine Laufnummer beigelegt zu werden. Einzelne Meßstellen kann man dann durch Abzählen innerhalb eines Blockes ermitteln.

In großen Stahlwerken werden z. B. die Kennwerte jedes einzelnen Stahlblockes – der sogenannten Bramme –, wie Gewicht, Legierungsbestandteile usw., in derartigen Meßreihen registriert. Ein Verteiler fragt zunächst eine Laufnummer und dann die einzelnen Meßstellen, die Uhrzeit, Analysenmeßplätze, Registriergeräte für eingegebene Zuschläge am Schmelzofen usw. ab. In derartigen Anlagen wird als Locher vorzugsweise der Lochstreifen-Übertrager 15 (s. Bild 7) verwendet, der gleichzeitig im Abtasterteil die Wiederabtastung und Auswertung des Bandes ermöglicht.

Die Entscheidung, ob ein Locher für Parallel- oder Serienbetrieb verwendet werden soll, hängt von der Entfernung der einzelnen Meßstellen untereinander ab. Für größere Entfernungen ist es zweckmäßiger, jeweils eine einzelne Leitung für Serienbetrieb anstelle der sechs für Parallelbetrieb erforderlichen Leitungen zu verlegen.

Ein weiteres Verfahren, bei dem die Meßwerte blockweise in Lochstreifenkarten (s. Bild 3) aufgenommen werden, ermöglicht es, jeder Bramme eine solche Karte als Begleitpapier mitzugeben. Auf diesen Karten ist zudem genügend Platz zum Eintragen handschriftlicher Zwischennotizen vorhanden. Außerdem lassen sich die Karten sortieren.

Steuerung elektronischer Musikinstrumente

Im »Siemens-Studio für elektronische Klanggestaltung« ist der Streifenlocher 17 das Grundgerät für die Herstellung von Steuerlochstreifen. Die vier zur Steuerung von Tonhöhen, Oktaven, Lautstärken und Klangfarben elektronischer Musikinstrumente benutzten Lochstreifen müssen genau synchron gelocht werden. Zwei Streifenlocher 17 sind an eine Klaviatur angeschlossen, die der normaler Musikinstrumente entspricht. Mit ihrer Hilfe stellt man zunächst die Lochstreifen für Tonhöhen und Oktaven her. Bei Anschlag einer Taste wird je ein Zeichen gelocht, das dem kürzest möglichen Ton entspricht und mit seiner Information Tonhöhe und Oktave festlegt. Für längere Töne oder für längeres Halten einer Information wird das Zeichen entsprechend oft gelocht. Die Anzahl der gleichen Zeichen wird durch ein vorher für jede Information eingestelltes Zählwerk begrenzt; dieses setzt den Locher nach der richtigen Anzahl selbsttätiger Lochungen wieder still. Mit Hilfe dieser beiden Lochstreifen werden anschließend die Streifen für Lautstärke und Klangfarbe hergestellt.

Zum Abspielen der Musikstücke laufen diese vier Streifen synchron durch ebenso viele Abtaster. Sie steuern dabei elektronische Musikinstrumente. Die erzeugten Klänge werden dann gleichzeitig auf ein Tonband übernommen. Ein besonderer Vorzug dieses Verfahrens besteht darin, daß sich mit seiner Hilfe, ohne Tonhöhen und Rhythmen zu verändern, die musikalischen Tempi beliebig durch verschiedene Laufgeschwindigkeiten der Lochstreifen abwandeln lassen.

Lochstreifen-Sender für Tandembetrieb mit zwei Lochstreifen-Abtastern

Mit einer solchen Einrichtung lassen sich z. B. in Fernschreib-Speichervermittlungen [5] zahlreiche kurze Nachrichten, die auf derselben Leitung gesendet werden sollen, zu einem ununterbrochenen Nachrichtenfluß zusammenfügen. Dadurch kann die Leitung optimal ausgenutzt werden. Dieser Lochstreifen-Sender besteht aus zwei Abtastern in Tandemschaltung und aus einem Sendeverteiler. Durch eine zusätzliche Steuerung kann abwechselnd einer der beiden Abtaster mit dem Sendeverteiler zusammenarbeiten, während der andere stillsteht. In diesen legt man den Streifen mit der nächsten Nachricht ein. Ist im ersten Abtaster der Streifen zu Ende, so bleibt dieser stehen und der zweite wird automatisch in Betrieb gesetzt. Auf diese Weise ergibt sich eine lückenlose Übertragungsfolge, solange neue Lochstreifen eingelegt werden.

Steuerungen von Werkzeugmaschinen

Bei Werkzeugmaschinen-Steuerungen [6] kann zwischen zwei wesentlichen Prinzipien unterschieden werden, der Positions- und der Bahnsteuerung. Die erste erfordert für einen Durchlauf das Ansteuern einer begrenzten Anzahl von festgelegten Positionen, wobei die Zwischenwerte auf dem Wege zwischen zwei derartigen Positionen unwichtig sind. Die Bahnsteuerung führt dagegen Werkstück und Werkzeug auf einer genau festgelegten und an jedem Punkt genau tolerierten Bahn aneinander vorbei. Die Positionssteuerung benötigt wesentlich weniger unterschiedliche Angaben als die Bahnsteuerung, für die nur in sehr einfachen Fällen ein Lochstreifen mit 5-Schritt-Code ausreicht. In einigen Fällen hilft man sich dadurch, daß ein oder mehrere Lochstreifen lediglich als erste Informationsgrundlage benutzt werden und mit ihrer Hilfe dann ein Steuer-Magnettonband erstellt wird, das die Steuerung mit höherer Geschwindigkeit als der Lochstreifen vornimmt.

Will man den gegebenen Code besser ausnutzen, so wird man zweckmäßigerweise die Bahnsteuerung auf eine Positionssteuerung zurückführen; dazu kann z. B. ein interpolierender Rechner zwischen Lochstreifen-Abtaster und Werkzeugmaschine eingefügt werden. Eine Bahnsteuerung für begrenzte Ansprüche läßt sich mit Hilfe eines Lochstreifen-Abtasters ausführen, wenn man den Lochstreifen vom Weg des Werkstückes oder Werkzeuges abhängig vorschiebt und die Angaben im Lochstreifen auf eine begrenzte Anzahl verschiedener Zustufen beschränkt (s. Bild 1).

Lochstreifen-Steuerungen können eingesetzt werden für fast sämtliche zerspanenden Werkzeugmaschinen, wie

Fräs-, Hobel- oder Bohrmaschinen. Bei den beiden ersteren sind es für Profilarbeiten im allgemeinen direkte oder indirekte Bahnsteuerungen, wogegen man bei Bohrmaschinen mit einfacheren Positionssteuerungen auskommt.

Steuerung von Brennöfen in der keramischen Industrie

Ein weiterer Verwendungsbereich mit unterschiedlichen Bedingungen bietet sich z. B. auch in der Feinkeramik beim Durchfahren genauester Brennofenprogramme an. Diese Programme sind im wesentlichen als Positionssteuerungen anzusehen.

Die Anwendungen der Lochstreifen als billige Speicher und damit der Locher und Abtaster nehmen heute immer weiter zu. Dabei ergeben sich nicht nur immer neue Verwendungsmöglichkeiten in den einzelnen technischen Arbeitsgebieten, sondern es kommen auch ständig neuartige Anwendungsgebiete hinzu. Der Schwerpunkt bezüglich der Abtastgeschwindigkeit liegt etwa im Gebiet bis zu 100 Z/s.

Schrifttum

- [1] Kohler, S. und Vorbach G.: Ein schnellarbeitender Streifenlocher und seine Anwendungsmöglichkeiten. Siemens-Zeitschrift **31** (1957) 194 bis 195
- [2] Hinsche, K.: Der Siemens-Lochstreifen-Übertrager T 15. Feinwerktechnik **64** (1960) 409 bis 413
- [3] Wachs, W.: Lochstreifen-Übertrager 15. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 241 bis 243
- [4] Ruttkay, P.: Eight Ways to read punched tape. Control Engineering **8** (1961) 152 bis 153
- [5] Graf, W.: Die Fernschreib-Speichervermittlung der SABENA für voll- und halbautomatischen Betrieb. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 473 bis 478
- [6] Feist, W.: Rationalisierung durch numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 567 bis 574

Einfluß der Oberflächengüte auf den Wirkungsgrad von Dampfturbinen

VON LOTHAR SPEIDEL

Eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades großer Dampfturbinen erfordert u. a. auch eine Verbesserung der Oberflächengüte, weil durch eine raue Oberfläche beachtliche Zusatzverluste entstehen können. Amerikanische Untersuchungen an einer Vielzahl von Dampfturbinen haben dies gezeigt [1]; dabei war der Wirkungsgrad der Hochdruckteile allein durch die im ersten Betriebsmonat entstehenden Ablagerungen im Mittel um 3 % gesunken. Man wird einer derartigen Verschlechterung der Oberfläche während des Betriebes entgegenwirken, aber auch schon bei der Fertigung eine möglichst glatte Oberfläche anstreben. Um ein Maß für den hierbei notwendigen Aufwand zu erhalten, muß der Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauigkeit und

den dadurch hervorgerufenen Verlusten bekannt sein. Dieser Zusammenhang ist für die Strömung im Rohr und entlang einer ebenen Platte seit langem geklärt. Aber erst in den letzten zehn Jahren ist es gelungen, diese Erkenntnisse mit Hilfe der Grenzschichttheorie auch auf andere ohne Ablösung umströmte Körper zu übertragen [2, 3, 4]. Diese Arbeiten wurden – z.T. im Auftrag der Siemens-Schuckertwerke – überwiegend im Institut für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr. H. SCHLICHTING durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden nachfolgend zusammengestellt und in eine für die Berechnung der Rauigkeitsverluste einer Dampfturbine geeignete Form gebracht.

Vorliegende Ergebnisse über den Rauhigkeitseinfluß

Physikalischer Vorgang

Die Zähigkeit der technisch wichtigen Strömungsmittel – Luft, Wasser, Wasserdampf – ist so gering, daß ihr Einfluß auf eine sehr dünne, wandnahe Schicht, die Grenzschicht, beschränkt bleibt. Innerhalb dieser Grenzschicht nimmt die Geschwindigkeit infolge der in der Strömung auftretenden Schubspannung von dem Wert der Außenströmung bis auf Null an der Wand ab.

Es gibt zwei unterschiedliche Formen der Strömung innerhalb der Grenzschicht. Bei der in Dampfturbinen nur selten auftretenden laminaren Strömung bewegen sich alle Strömungsteilchen auf Bahnen parallel zur Wand; die Schubspannungen werden allein durch die Zähigkeit des strömenden Mediums erzeugt. Mit zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten (genauer: mit zunehmenden Reynoldsschen Zahlen) beginnt die Bewegung entlang wandparalleler Bahnen instabil zu werden, und die Flüssigkeitsteilchen führen unregelmäßige Schwankungsbewegungen um diese Mittellage aus: Die Grenzschicht geht in die in Turbinen vorherrschende turbulente Strömung über (Bild 1). Infolge der turbulenten Schwankungsbewegungen gelangen die Flüssigkeitsteile in Zonen größerer oder geringerer Geschwindigkeit und verursachen durch den damit verbundenen Impulsaustausch Schubspannungen, die die von der Zähigkeit verursachten Schubspannungen weit übersteigen. Dieser für die turbulente Strömung charakteristische Impulsaustausch muß unmittelbar an der Wand verschwinden, weil dort keine Schwankungsbewegungen senkrecht zur Wand möglich sind. In unmittelbarer Nähe der Wand müssen auch bei der turbulenten Grenzschicht die Schubspannungen allein durch die Zähigkeit erzeugt werden; man spricht von einer laminaren Unter-

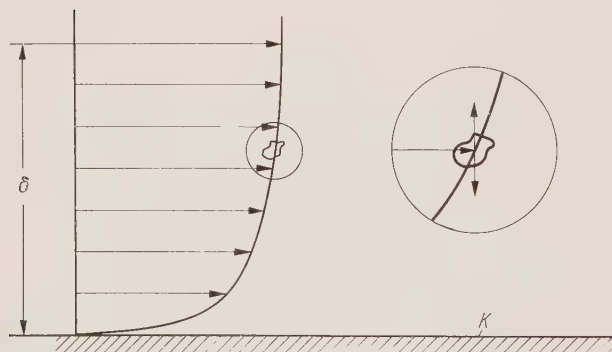
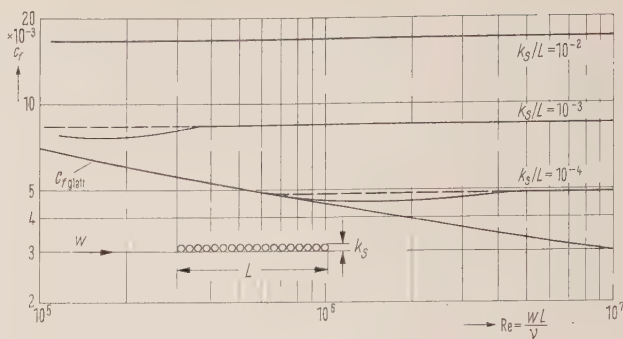


Bild 1 Geschwindigkeitsverteilung innerhalb einer turbulenten Grenzschicht an einem Teil der Profilkontur K . Die Grenzschichtdicke δ ist etwa 0,1 bis 1% der Profilschneenlänge. Der vergrößerte Ausschnitt (rechts) zeigt schematisch die turbulente Schwankungsbewegung eines einzelnen Flüssigkeitsballens



L Länge der Platte
 w Anströmgeschwindigkeit
 ν Kinematische Zähigkeit

k_s Mittlere Größe eines Sandkornes, aus der die Oberflächenrauigkeit gebildet wird

Bild 2 Widerstandsbeiwert c_f der sandrauhnen ebenen Platte als Funktion der Reynoldszahl $Re = \frac{wL}{\nu}$

schicht, die allerdings im Vergleich zur gesamten Grenzschichtdicke δ sehr klein ist.

Sind die Rauigkeiten der Wand so klein, daß sie gewissermaßen von der laminaren Unterschicht eingehüllt bleiben, so ändern diese Rauigkeiten nichts an den Schubspannungen; die Oberfläche wirkt hydraulisch glatt. Erst wenn die Rauigkeitserhebungen aus der laminaren Unterschicht herausragen, wird der Impulsaustausch der turbulenten Schwankungsbewegungen an diesen Rauigkeiten verstärkt, und es entsteht ein zusätzlicher Reibungswiderstand.

Strömung an einer sandrauhnen, ebenen Platte

Der qualitativ beschriebene Vorgang sei nun noch durch quantitative Angaben über die Strömung parallel zu einer sandrauhnen, ebenen Platte ergänzt, die später zur Bestimmung der Rauigkeitsverluste eines Schaufelgitters benötigt werden. Ist die Oberfläche der Platte hydraulisch glatt, dann ist der Widerstandsbeiwert

$$c_{f \text{ glatt}} = \frac{W}{L \frac{\rho}{2} w^2} = 0,455 \left(\log \frac{wL}{\nu} \right)^{-2,58} \quad (1)$$

nur eine Funktion der Reynoldsschen Zahl $Re = \frac{wL}{\nu}$

In der Gleichung bedeuten:

- W Reibungswiderstand einer Plattenseite
- L Länge der Platte
- ρ Dichte
- w Anströmgeschwindigkeit
- ν Kinematische Zähigkeit

Überschreiten die Rauigkeitserhebungen den zulässigen Wert $k_{s \text{ zul}}$, so kommt ein zusätzlicher Rauigkeitswiderstand hinzu. Bild 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Widerstandsdiagramm der rauhen Platte. Der Widerstand der rauhen Platte nähert sich mit wachsender Reynoldszahl einem konstanten Wert, der nach [5] durch

die Beziehung

$$c_{f\text{rauh}} = (1,89 - 1,62 \log k_s/L)^{-2,5} \quad (2)$$

wiedergegeben wird. Die zulässige Rauigkeit $k_{s\text{zul}}$, unterhalb der die Platte hydraulisch glatt wirkt, läßt sich in dem Bereich der bei Strömungsmaschinen wichtigen Reynoldszahlen $10^5 < Re < 10^7$ aus der Beziehung

$$\frac{w k_{s\text{zul}}}{\nu} = 100 \quad (3)$$

ermitteln. Es ist bemerkenswert, daß es bei der Bestimmung der zulässigen Rauigkeit nur auf den Absolutwert der Rauigkeit k_s und nicht auf deren Verhältnis zu anderen Längen des Körpers ankommt.

Einfluß der Rauigkeitsform

Die in den Gleichungen (2) und (3) angegebenen Beziehungen für die zulässige Rauigkeit und den Widerstandsbeiwert der rauhen Platte gelten nur für eine bestimmte Form der Oberflächenrauigkeit, die durch dicht nebeneinander gepackte Sandkörner gleicher Korngröße k_s entsteht. Wenn die für die Sandrauigkeit ermittelten Widerstandsbeiwerte auf andere Rauigkeitsformen übertragen werden sollen, muß bekannt sein, welche für die betreffende Rauigkeitsform charakteristische Rauigkeitshöhe k der Sandkorngröße k_s äquivalent ist, damit beide Rauigkeitsformen den gleichen Widerstandsbeiwert hervorrufen. In [6] ist für eine Reihe von geo-

metrisch einfachen Rauigkeitsformen die äquivalente Sandrauigkeit bestimmt worden. Einen Ausschnitt der Ergebnisse zeigt Bild 3, wobei die Rauigkeiten entsprechend der äquivalenten Sandrauigkeit geometrisch so vergrößert oder verkleinert wurden, daß alle im Bild dargestellten Rauigkeiten den gleichen Widerstandsbeiwert hervorrufen. Von besonderem praktischem Interesse ist die äquivalente Sandrauigkeit einer gefrästen Oberfläche. Wie Bild 3 zeigt, ist bei einer Anströmung senkrecht zu den Fräsriefen die der Sandrauigkeit äquivalente Rauigkeitshöhe $k = 2,56 k_s$, d. h., der Widerstandsbeiwert der sandrauen Platte wird erst erreicht, wenn die Höhe der Fräsrauhigkeit 2,56 mal so groß wie die der Sandrauigkeit ist.* Bei gleicher Rauigkeitshöhe ist die fräsrauhige Oberfläche also glatter als die sandrauhe.

Wird die fräsrauhige Oberfläche in Richtung der Fräsriefen angeströmt, dann beträgt die äquivalente Sandrauigkeit sogar $k = 5 k_s$. Jedoch führt bereits ein Abweichen der Strömungsrichtung um 10° von der Richtung der Fräsriefen zu einem Absinken der äquivalenten Sandrauigkeit auf den Wert der Anströmung senkrecht zu den Fräsriefen. Für die spätere Untersuchung der durch betriebliche Oberflächenveränderungen möglichen Rauigkeiten ist noch die Rauigkeit einer verrosteten Oberfläche von Bedeutung. An einer im Betrieb stark verrosteten Schaufel, an der bereits einzelne Rostfladen ablättern, wurde festgestellt, daß diese Oberflächenform der einer Sandrauigkeit mit einer Sandkorngröße $k_s = 0,071$ mm entspricht.

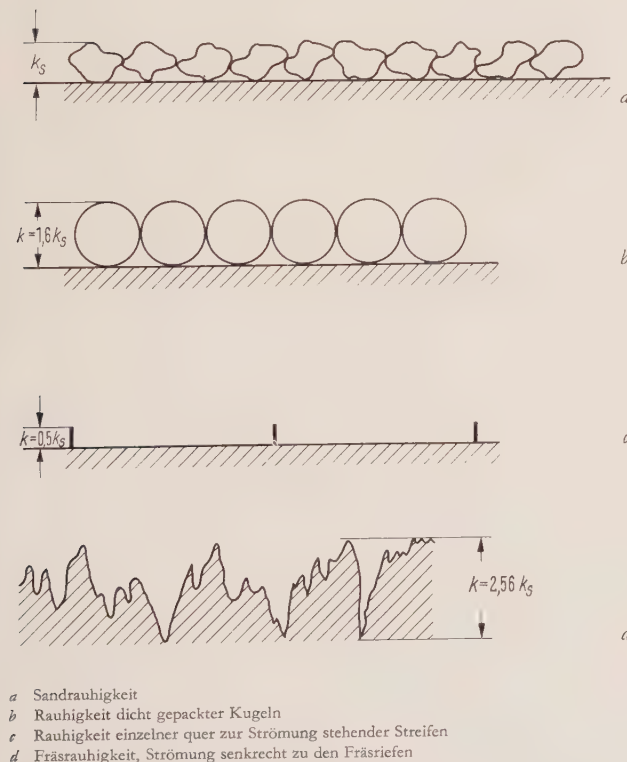
Rauigkeitsverluste des Schaufelgitters

Der durch die Rauigkeit verursachte Verlust ist ein Reibungsverlust. Deshalb wird durch die Oberflächenrauigkeit nur der durch die Reibung hervorgerufene Verlustanteil des Schaufelgitters beeinflusst, der als einziger Verlust des ebenen oder zweidimensionalen ohne Ablösung durchströmten Gitters auch als ebener Verlust bezeichnet wird. Der von der ebenen Platte her bekannte Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Strömung läßt sich in einfacher Weise auf das Schaufelgitter übertragen, wenn man die Ergebnisse der theoretischen Berechnungen des ebenen Gitters verwendet [7, 8]. Nach [8] errechnet sich der Verlustbeiwert eines ohne Ablösung durchströmten Schaufelgitters zu

$$\zeta_V = \frac{\Delta p_g}{\frac{\rho}{2} w_k^2} = c_f \left[\int_K \left(\frac{w_k}{w_2} \right)^{3,5} d \frac{s}{l} \right]^{0,8} \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

Δp_g Gesamtdruckverlust
 w_k Geschwindigkeit an der Kontur



a Sandrauigkeit
b Rauigkeit dicht gepackter Kugeln
c Rauigkeit einzelner quer zur Strömung stehender Streifen
d Fräsrauhigkeit, Strömung senkrecht zu den Fräsriefen

Die Rauigkeiten wurden so dargestellt, daß sie jeweils den gleichen Widerstand hervorrufen

Bild 3 Äquivalente Sandrauigkeit einiger Rauigkeitsformen

* Bei dieser im Institut für Strömungsmechanik der Technischen Hochschule Braunschweig durchgeführten Messung wurde die im Maßstab 600:1 geometrisch vergrößerte Nachbildung einer fräsrauen Platte verwendet.

- w_2 Geschwindigkeit hinter dem Gitter
 s Koordinate entlang der Kontur
 l Sehnenlänge
 K Integration entlang der Kontur

Der Verlustbeiwert ist also dem Widerstandsbeiwert der ebenen Platte proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist lediglich eine Funktion der Geschwindigkeitsverteilung an der Kontur. Dieser Zusammenhang ist experimentell für Gitter mit glatter [8] und rauher [4] Oberfläche bestätigt worden. Vergleicht man Gitter mit unterschiedlicher Rauigkeit, aber gleicher Geometrie und Zuströmung, so ist wegen der gleichen Geschwindigkeit an der Kontur

$$\frac{\zeta_{V \text{ rauh}}}{\zeta_{V \text{ glatt}}} = \frac{c_{f \text{ rauh}}}{c_{f \text{ glatt}}} \quad (5)$$

Der Verlustbeiwert für rauhe Oberfläche verhält sich zu dem für glatte Oberfläche wie die entsprechenden Widerstandsbeiwerte der ebenen Platte. Für die weitere Abschätzung der Verluständerung infolge der Oberflächenrauigkeit ist es bequem, das Verhältnis $c_{f \text{ rauh}}/c_{f \text{ glatt}}$ durch eine Funktion der Rauigkeit selbst zu ersetzen. Nimmt man hierfür in erster Näherung an, daß der Widerstandsbeiwert der sandrauen Platte durch den nach Gleichung (3) angegebenen konstanten Wert bis zum Erreichen der zulässigen Rauigkeit genau genug angegeben ist (gestrichelte Linie in Bild 2)*, so ergibt sich aus den Gleichungen (2) und (5) die gesuchte Funktion:

$$\frac{\zeta_{V \text{ rauh}}}{\zeta_{V \text{ glatt}}} = \frac{c_{f \text{ rauh}}}{c_{f \text{ glatt}}} \left(\frac{1,89 - 1,62 \log \frac{k_{s \text{ zul}}}{l}}{1,89 - 1,62 \log k_s} \right)^{2,5} \quad (6)$$

Für die Auswertung muß noch $k_{s \text{ zul}}/l$ bekannt sein. Wie Untersuchungen an Turbinengittern [4] gezeigt haben, kann die Bestimmung der zulässigen Rauigkeit des Schaufelgitters von der ebenen Platte übernommen werden, nur muß jetzt die Anströmgeschwindigkeit der Platte w durch die Abströmgeschwindigkeit des Turbinengitters w_2 ersetzt werden.**

Für das Turbinengitter ergibt sich also:

$$\frac{k_{s \text{ zul}} w_2}{\nu} = 100 \quad (7)$$

Für das Verhältnis $k_{s \text{ zul}}/l$ in Gleichung (6) erhält man dann mit der mit l gebildeten Reynoldszahl:

$$\frac{k_{s \text{ zul}}}{l} = \frac{k_{s \text{ zul}} w_2}{l w_2} = \frac{\nu}{l w_2} \quad (8)$$

* Diese Näherung wird im Übergangsgebiet bis zur vollausgebildeten Rauigkeitsströmung (konstanter Widerstandsbeiwert) den technischen Rauigkeiten besser gerecht, als der bei Sandrauigkeit auftretende Verlauf. Bei technischen Rauigkeiten wird im Übergangsgebiet der konstante Wert der vollrauen Strömung nicht unterschritten.

** Beim Verdichtergitter ist w durch die Zuströmgeschwindigkeit w_1 zu ersetzen.

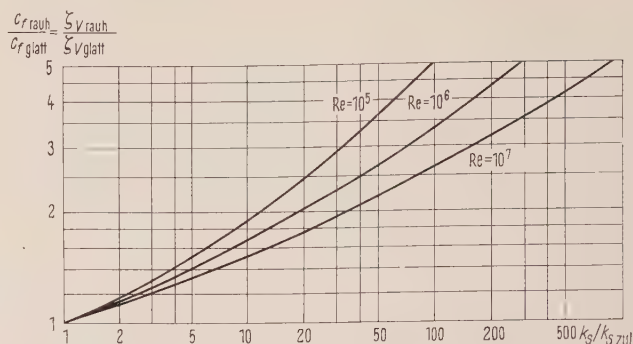


Bild 4 Änderung des Verlustbeiwertes beim Überschreiten der zulässigen Rauigkeit für verschiedene Reynoldszahlen

Gleichung (6) wurde für die in Dampfturbinen wichtigen Reynoldszahlen $Re = l w_2 / \nu = 10^5, 10^6$ und 10^7 ausgewertet. Die Kurven für die einzelnen um eine Zehnerpotenz verschiedenen Reynoldszahlen weichen nur geringfügig voneinander ab (Bild 4).

Das Verhältnis der Verluste bei rauher Schaufel zu denen bei glatter Schaufel kann also in weiten Grenzen als von der Reynoldszahl unabhängig angesehen werden.

Rechenbeispiel für eine 100-MW-Dampfturbine

Zulässige Rauigkeit

Die Berechnung der zulässigen Rauigkeit sowie der zusätzlichen Rauigkeitsverluste wird hier am Beispiel einer

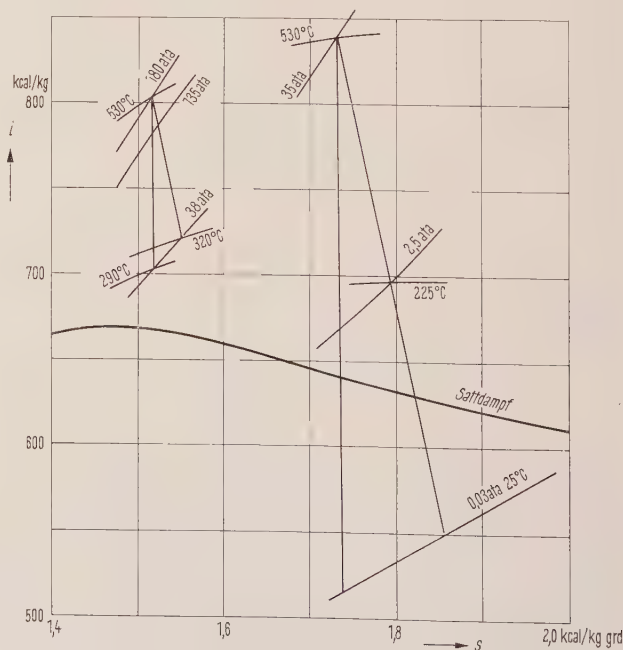


Bild 5 Angenommener Verlauf des Dampfzustandes im i - s -Diagramm (Beispiel für eine 100-MW-Dampfturbine)

100-MW-Dampfturbine mit Zwischenüberhitzung durchgeführt, um für die einzelnen Maschinenteile einen Überblick über die notwendige Oberflächengüte zu erhalten, die in der Fertigung und im Betrieb angestrebt werden muß.

In Bild 5 ist die für die Berechnung gewählte Zustandsänderung im i - s -Diagramm für Wasserdampf eingetragen. Die Annahmen über den Verlauf der Abströmgeschwindigkeit w_2 und der Profilschenlänge l sind in Bild 6 über dem isentropen Gefälle aufgetragen. Zugleich zeigt Bild 6 den aus der Zustandsänderung des Dampfes folgenden Verlauf der kinematischen Zähigkeit ν .

Für die als Beispiel gewählte Dampfturbine wurde die zulässige Sandrauhigkeit $k_{s,zul}$ nach Gleichung (3) errechnet und über dem isentropen Gefälle aufgetragen (Bild 7). Die zulässige Sandrauhigkeit steigt dabei von $0,7\text{ }\mu\text{m}$ am Anfang des Hochdruckteiles auf $12\text{ }\mu\text{m}$ am Ende des Niederdruckteiles; die Forderungen an die Oberflächengüte sind also im Hochdruckteil der Dampfturbine am größten. Bild 7 enthält die entsprechenden Werte der Fräsrauhigkeit; dabei wurde für das bei den Siemens-Schuckertwerken gebräuchliche Fräsverfahren, bei dem die Fräsriefen in Strömungsrichtung verlaufen, eine äquivalente Sandrauhigkeit von $k/k_s = 4$ eingesetzt. Dieser gegenüber der gemessenen äquivalenten Sandrauhigkeit von $k/k_s = 5$ ungünstige Wert wurde gewählt, um auch gelegentliche Abweichungen der Strömung von der Richtung der Fräsriefen zu berücksichtigen. Bei der in der Schaufelfertigung des Mülheimer Werkes der Siemens-Schuckertwerke erreichten Oberflächengüte von 3 bis $10\text{ }\mu\text{m}$ (wobei $10\text{ }\mu\text{m}$ bereits als sehr schlecht gilt), wird lediglich im Hochdruckteil die Forderung einer hydraulisch glatten Oberfläche nicht vollständig erfüllt.

Zusätzliche Rauigkeitsverluste

Für die als Beispiel gewählte 100-MW-Turbine sollen die Zusatzverluste für den Fall abgeschätzt werden, daß die Rauigkeit den zulässigen Wert übersteigt. Dabei wird angenommen, daß die Rauigkeit aller Stufen gleich ist – eine Annahme, die bei gleichen Fertigungsverfahren aller Stufen zutrifft. Für die Bestimmung des Verlustes bei rauher Oberfläche nach Gleichung (6) muß noch eine Annahme über die Verluste bei glatter Oberfläche gemacht werden. Es wurde $\zeta_{V,glatt} = 0,05$ bei $Re = 5 \cdot 10^5$ angenommen, woraus sich der Verlustbeiwert für glatte Schaufeln mit den jeweiligen Reynoldszahlen nach Gleichung (1) für die einzelnen Gefälleabschnitte errechnen läßt. Die Einzelheiten der Rechnung sind in Tafel 1 zusammengestellt. Der Einfachheit halber wurde dieser Rechnung zur Bestimmung von $\zeta_V/\zeta_{V,glatt} = f(k_s/k_{s,zul})$ in allen Punkten die für $Re = 10^6$ ermittelte Kurve (s. Bild 4) zugrunde gelegt. In Bild 8 sind über dem Gefälle die so ermittelten ört-

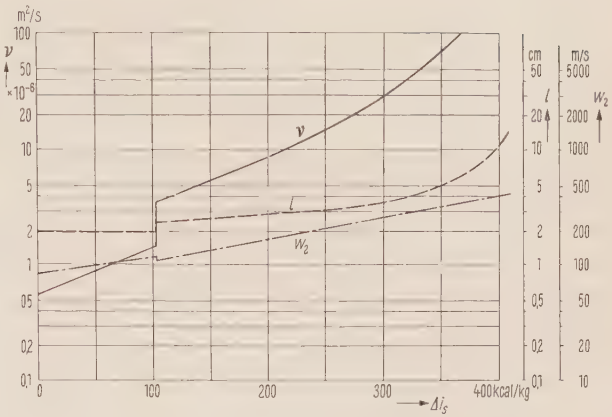
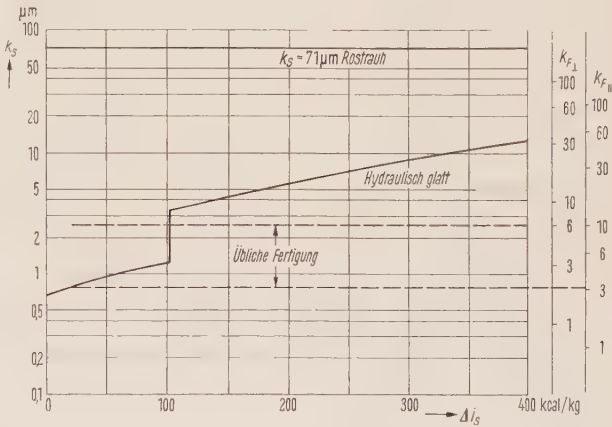


Bild 6 Vorgegebene Werte der Profilschenlänge l und der Abströmgeschwindigkeit w_2 . Aus dem Verlauf des Dampfzustandes nach Bild 5 ergibt sich der Verlauf der kinematischen Zähigkeit ν



k_s Sandrauhigkeit
 $k_{F\perp}$ Fräsrauh, Anströmung senkrecht zur Fräsriefe
 $k_{F||}$ Fräsrauh, Anströmung parallel zur Fräsriefe

Bild 7 Zulässige Rauigkeit nach Gleichung (3), aufgetragen über dem isentropen Gefälle Δi_s entsprechend Bild 5. Die in der Fertigung erreichte Oberflächenrauigkeit überschreitet nur im Hochdruckteil der als Beispiel gewählten 100-MW-Dampfturbine die zulässige Rauigkeit

lichen Reibungsverluste für die gewählten Rauigkeiten aufgetragen. Entsprechend den geringen zulässigen Rauigkeiten im Hochdruckteil sind die Rauigkeitsverluste dort am größten und übersteigen bei vollständig verrosteter Schaufel den Verlust an der glatten Schaufel um mehr als 8%. Zur Bestimmung der Wirkungsgradänderung der ganzen Turbine muß noch berücksichtigt werden, daß die durch die Turbine strömende Dampfmenge durch die Entnahme zur Speisewasservorwärmung allmählich verringert wird. Aus diesem Grunde ist in Bild 9 die Beziehung $\Delta \zeta_V = \zeta_{V,rauh} - \zeta_{V,glatt}$ über Δi_s , \dot{G}/\dot{G}_0 (\dot{G} örtlicher Durchsatz, \dot{G}_0 Eintrittsdampfmenge) aufgetragen und dann für den Hochdruckteil allein sowie für die ganze Turbine gemittelt worden. Das Ergebnis dieser

	Radraum	vor Zwischenüberhitzung	nach	Ende 2. Gehäuse	Ende 3. Gehäuse
t °C	480	320	530	220	25
p ata	135	38	35	2,5	0,03
h_s kcal/kg	21	102	102	258	408
l mm	20	20	24	30	150
w_2 m/s	90	120	110	220	400
v m ² /s	$7 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$3,63 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$(5 \cdot 10^{-4})$
k_{szul} µm	0,78	1,27	3,3	7,3	12,5
$Re = w_2 l / v$	$2,57 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
ζV_{glatt}	0,0361	0,0397	0,0466	0,0514	0,069
k_s/k_{szul}	2,56	1,57			
$k_s = 2 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	1,2	1,07			
ζV_{rauh}	0,0433	0,0424			
k_s/k_{szul}	6,41	3,94	1,36		
$k_s = 5 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	1,48	1,28	1,06		
ζV_{rauh}	0,0535	0,0508	0,0495		
k_s/k_{szul}	12,8	7,88	3,03	1,37	
$k_s = 10 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	1,78	1,55	1,25	1,05	
ζV_{rauh}	0,0643	0,0615	0,0583	0,054	
k_s/k_{szul}	25,6	15,7	6,06	2,74	1,60
$k_s = 20 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	2,2	1,9	1,47	1,22	1,08
ζV_{rauh}	0,0793	0,0753	0,0686	0,0627	0,0745
k_s/k_{szul}	51,3	31,4	12,1	5,48	3,2
$k_s = 40 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	2,7	2,33	1,75	1,47	1,26
ζV_{rauh}	0,0975	0,0925	0,0816	0,0756	0,087
k_s/k_{szul}	91	56	21,5	9,7	5,7
$k_s = 71 \mu m; c_f/c_{f,glatt}$	3,3	2,8	2,1	1,65	1,5
rostrauh ζV_{rauh}	0,119	0,111	0,098	0,085	0,103

Tafel 1 Bestimmung der zulässigen Sandrauhigkeit und der Rauigkeitsverluste für eine 100-MW-Dampfturbine

Mittelung ist in Bild 10 für die bei allen Schaufeln gleichmäßige Sandrauhigkeit aufgetragen. Auf der Abszisse ist die der ungünstigsten Herstellungsrauhigkeit entsprechende Sandrauhigkeit gekennzeichnet. Eine Verbesserung der Oberflächenherstellung ergibt eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Turbine um 0,2 Wirkungsgradpunkte und des Hochdruckteiles allein um 0,7 Wirkungsgradpunkte. Demgegenüber ist bei einer vollständig verrosteten Anlage ein erheblicher Wirkungsgradabfall möglich. Mit einem Wert von $k_s = 71 \mu m$, der der Rauigkeit verrosteter Schaufeln entspricht, erhält

man für das gewählte Beispiel einen Wirkungsgradabfall von fast 5 Wirkungsgradpunkten. Der Hochdruckteil allein wird um fast 8 Wirkungsgradpunkte verschlechtert.

Vergleich dieser Abschätzung mit amerikanischen Messungen

In [1] wird über Messungen an großen Dampfturbinen berichtet. Diese Messungen lassen erkennen, daß der bei der Inbetriebnahme vorhandene Wirkungsgrad mit zunehmender Betriebszeit infolge betrieblicher Ablage-

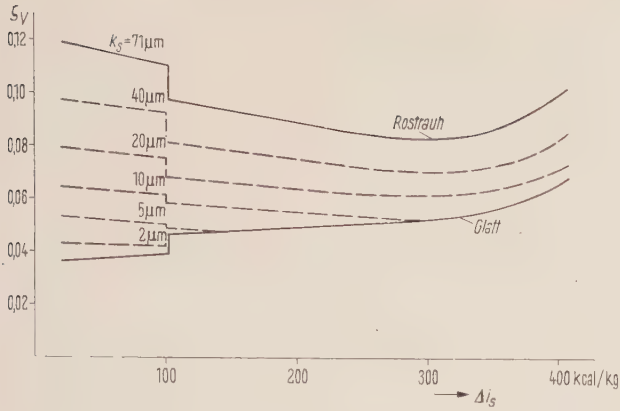


Bild 8 Örtliche Reibungsverluste der als Beispiel gewählten 100-MW-Dampfturbine über dem isentropen Gefälle entsprechend Bild 5. Die Reibungsverluste »Glatt« gelten bei hydraulisch glatter Oberfläche. Die Verluste bei rauher Oberfläche gelten unter der Annahme, daß alle Schaufeln mit einer Oberfläche gleicher Sandrauhigkeit k_s überzogen sind

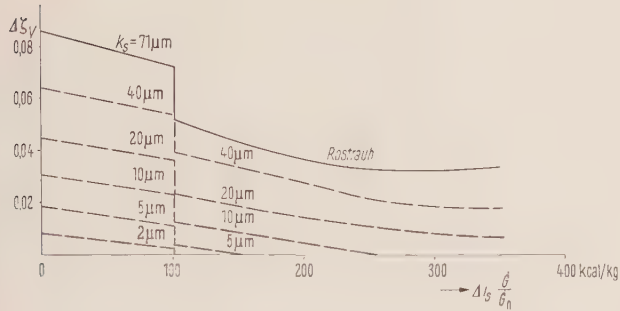


Bild 9 Örtliche, durch die Rauigkeit hervorgerufene Zusatzverluste $\Delta \zeta_V = \zeta_{V_{\text{rau}}} - \zeta_{V_{\text{glatt}}}$ bei einer über alle Schaufeln gleichmäßig verteilten Sandrauhigkeit, abhängig von Δi_s , \dot{G}/\dot{G}_0 (\dot{G} örtlicher Durchsatz, \dot{G}_0 Eintrittsdampfmenge) für den Verlauf des Dampfzustandes entsprechend Bild 5

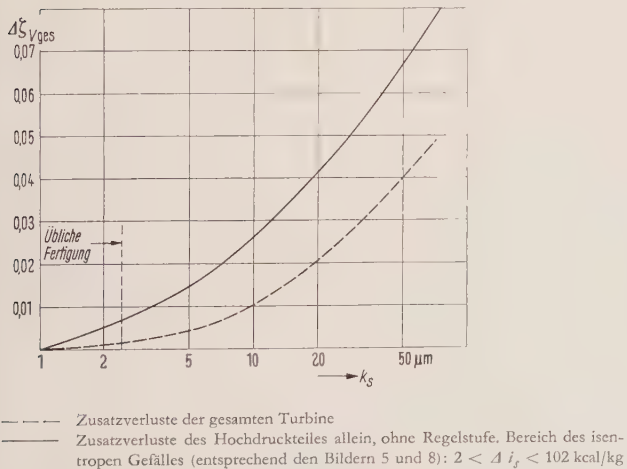


Bild 10 Zusatzverluste $\Delta \zeta_{V_{\text{ges}}}$ der als Beispiel gewählten 100-MW-Turbine, abhängig von einer über alle Schaufeln gleichmäßig verteilten Sandrauhigkeit k_s

rungen sinkt und sich nach etwa einem Monat asymptotisch einem Grenzwert nähert. Die sich daraus ergebende Verschlechterung des Wirkungsgrades wird für den Hochdruckteil mit etwa 3% und für den Mitteldruckteil mit etwa 1,7% angegeben. Dieses unterschiedliche Verhalten ist – bei gleichem Ausmaß der Oberflächenverschlechterung – mit der im Mitteldruckteil infolge der veränderten Dampfzustände größeren zulässigen Rauigkeit zu erklären.

Da die Dampfzustände der in [1] untersuchten Turbinen dem hier gebrachten Beispiel ähneln, kann man aus der angegebenen Wirkungsgradminderung von 3% im Hochdruckteil abschätzen, welcher Sandrauhigkeit die im Betrieb entstehende Oberflächengüte entspricht. Aus Bild 10 ergibt sich hierfür eine Sandrauhigkeit von $k_s = 12 \mu\text{m}$.

Zusammenfassend läßt sich am Beispiel der 100-MW-Turbine feststellen:

Die zulässige Rauigkeit, d. h. diejenige Rauigkeit, bei der gerade noch keine zusätzlichen Rauigkeitsverluste entstehen, ist im Hochdruckteil der Turbine am geringsten; sie wächst bis zum Niederdruckteil um etwa eine Zehnerpotenz. Die bei der Fertigung im Mülheimer Werk der Siemens-Schuckertwerke erzielte Oberflächengüte ist bis auf den Hochdruckteil der Dampfturbine besser als gefordert, so daß die Beschaukelung bei der Inbetriebnahme bis auf den Hochdruckteil hydraulisch glatt ist.

Das durch die Fertigung bedingte Überschreiten der zulässigen Rauigkeit im Hochdruckteil hat dort einen Zusatzverlust von 0,7% zur Folge, der für die ganze Maschine einer Wirkungsgradminderung von 0,2% entspricht. Demgegenüber sind die Zusatzverluste, die durch im Betrieb hervorgerufene Rauigkeiten entstehen, erheblich größer. Als oberen Grenzwert erhält man für eine vollständig verrostete Maschine eine Wirkungsgradminderung des Hochdruckteiles von 8% und der ganzen Maschine von 5%. Im Normalbetrieb ist, wie amerikanische Untersuchungen gezeigt haben, mit einer Wirkungsgradminderung von 3% im Hochdruckteil nach einmonatigem Betrieb zu rechnen.

Schrifttum

- [1] Angelo, I. und Cotton, K. C.: Observed effects of deposits on steam turbine efficiency. ASME Pap. Nr. 57-A-116
- [2] Schlichting, H.: Anwendung der Grenzschichttheorie auf Strömungsprobleme der Turbomaschinen. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 429 bis 438
- [3] Scholz, N.: Über eine rationelle Berechnung des Strömungswiderstandes schlanker Körper mit rauher Oberfläche. Jahrbuch d. Schiffbautechn. Ges. 45 (1951) 244 bis 263
- [4] Speidel, L.: Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Strömungsverluste in ebenen Schaufelgittern. Forsch. a. d. Geb. d. Ing.-Wes. 20 (1954) 129 bis 140
- [5] Schlichting, H.: Grenzschichttheorie. 3. Aufl. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1958
- [6] Schlichting, H.: Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem. Ing.-Arch. 7 (1936) 1 bis 34
- [7] Schlichting, H. und Scholz, N.: Über die theoretische Berechnung der Strömungsverluste eines ebenen Schaufelgitters. Ing.-Arch. 19 (1951) 42 bis 65
- [8] Speidel, L. und Scholz, N.: Untersuchungen über die Strömungsverluste in ebenen Schaufelgittern. VDI-Forschungsheft 464 (1957)

Selektivität von Installations-Schaltgeräten

VON BRUNO MEILER UND WALTER RAUCH

Die verbreitetste Netzform in der Installationstechnik ist das Strahlennetz. Die folgenden Untersuchungen sollen deshalb hierauf beschränkt werden. Im Strahlennetz liegen Schaltgeräte in Reihe, die im Fall einer Störung vom gleichen Strom durchflossen werden, abgesehen von den Teilströmen »gesunder« Abzweige, die meistens gegen-

über dem Kurzschlußstrom gestörter Abzweige nicht ins Gewicht fallen. Bei selektiv gestaffelten Schaltgeräten spricht im Störfall nur das der Schadenstelle am nächsten gelegene Schaltgerät an und trennt den gestörten Zweig ab (Bild 1a). Mangelhafte Selektivität führt auch zum Ausfall »gesunder« Stromzweige (Bild 1b).

Bild 2 zeigt die Arbeitsweise einer Schmelzsicherung und eines Leitungsschutzschalters (LS-Schalters). Man unterscheidet bei Schmelzsicherungen zwei Zeitbegriffe:

1. Während der Schmelzzeit t_s fließt durch den metallischen Schmelzleiter Strom. Die dabei auftretende Stromwärme führt bei Überströmen zur Unterbrechung des Schmelzleiters am Ende der Schmelzzeit.
2. Mit dem Beginn der Lichtbogen- oder Löschzeit t_l wird die Unterbrechung des Stromkreises, d. h. die eigentliche Abschaltung, eingeleitet. Der Strom wird im Lichtbogen geführt und durch dessen hohen Widerstand auf Null gebracht.

Ähnlich sind die Verhältnisse bei Leitungsschutzschaltern: Der Ausschaltverzög t_v wird durch Überschreiten des Ansprechstromes eingeleitet und nach einer mechanisch notwendigen Verzögerungszeit durch die Kontakttrennung beendet. Der Stromkreis wird in der Lichtbogenzeit t_l abgeschaltet.

Die Abschaltung besteht also in jedem Fall aus einem Vorgang, in dem die Unterbrechung ausgelöst, und einem Vorgang, in dem sie vollzogen wird.

In den Strom-Zeit-Kennlinien (s. Bild 1) sind die Schmelzzeit von Sicherungen und der Ausschaltverzög von Schutzschaltern als Funktion des Stromes dargestellt. Wenn sich die Kennlinien von zwei verschiedenen Schutzorganen unter Berücksichtigung der Streubereiche nicht schneiden, so ist eine notwendige Bedingung für selektives Abschalten dieser Geräte erfüllt. Hinreichend ist diese Bedingung jedoch nicht, weil während der Lichtbogenzeit noch Strom fließt, der das vorgeschaltete Gerät zum Ansprechen bringen kann.

Bei thermischen Schaltgeräten (Sicherungen) wird die Schmelzzeit durch die Stromwärme $\sim \int i^2 dt$ bestimmt. Zwei Sicherungen sind dann selektiv, wenn der maximal mögliche Wert $\int i^2 dt$ der nachgeschalteten Sicherung für die Gesamtabschaltzeit geringer ist als der Wert $\int i^2 dt$ der vorgeschalteten Sicherungen für die Schmelzzeit allein.

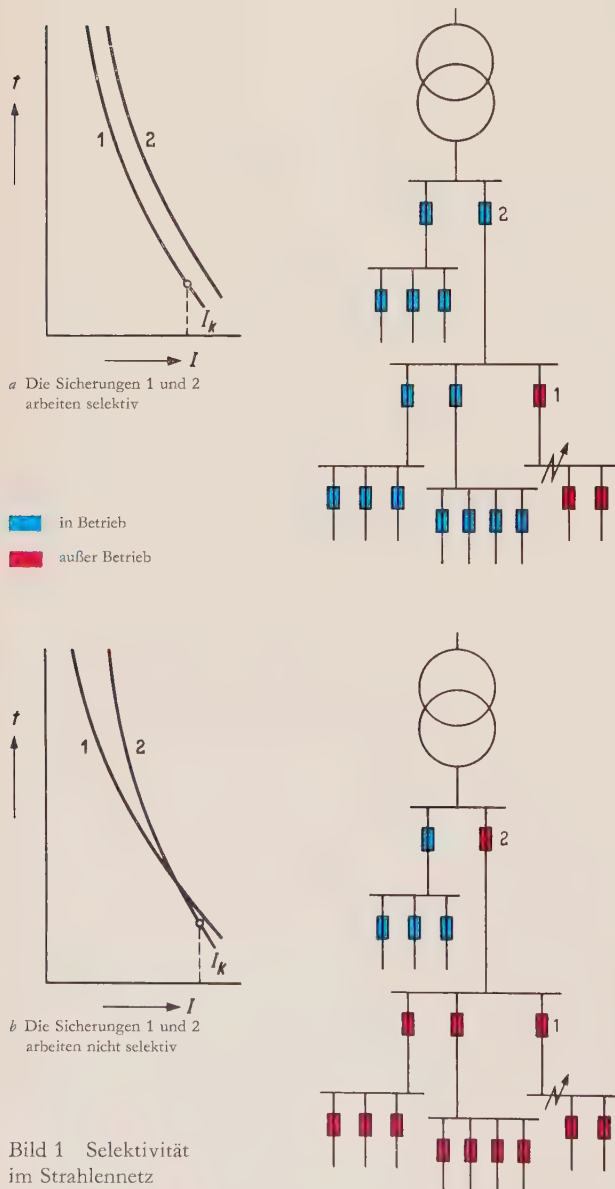


Bild 1 Selektivität im Strahlennetz

a Prüfkreis
G Stromquelle
R Widerstand
L Induktivität
Si Schmelzsicherung
LS Leitungsschutzschalter
Sch Schalter

b Abschaltung durch eine Schmelzsicherung
c Abschaltung durch einen Schalter
 t_s Schmelzzeit
 t_l Loschzeit
 t_v Ausschlitzverzug

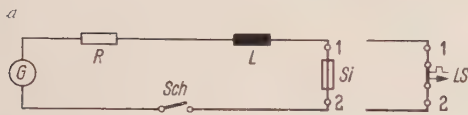
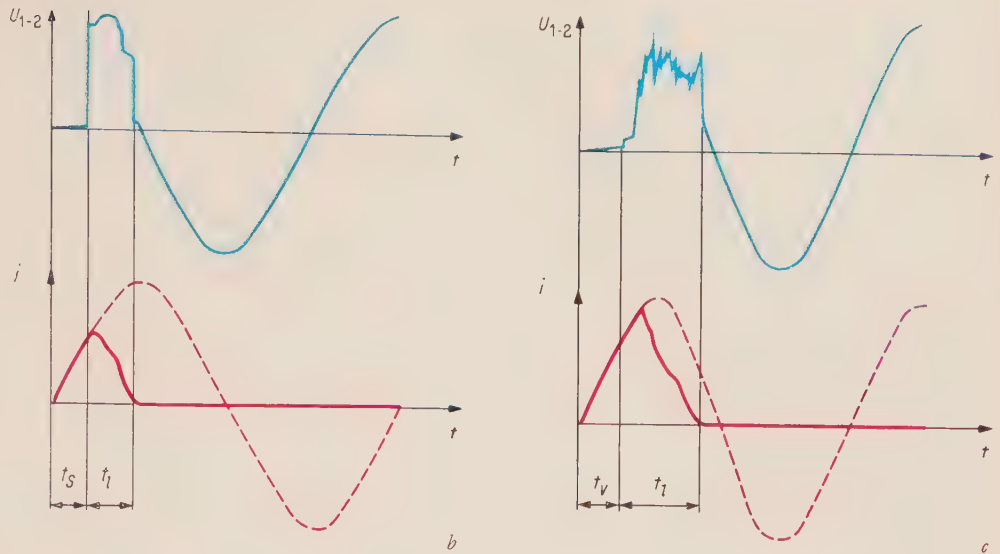


Bild 2 Spannungs- und Stromverlauf bei Abschaltungen durch eine Schmelzsicherung oder einen Leitungsschutzschalter

Die drei Nennstromstufen der Reihe A in Bild 3 sind miteinander selektiv, bei der Reihe B besteht dagegen keine Selektivität.

Beim selektiven Zusammenwirken von Leitungsschutzschaltern, die im Kurzschlußgebiet der Kennlinien vor allem durch die Stromhöhe ausgelöst werden, darf während der Abschaltung des nachgeschalteten Schutzschalters kein Stromwert auftreten, der bei dem vorgeschalteten Schutzschalter den Impuls zur Öffnung der Kontakte gibt; oder das Auslösen des vorgeschalteten Schutzschalters muß künstlich mindestens so lange verzögert werden, bis durch den Abschaltvorgang der Strom wieder unter den Ansprechwert des vorgeschalteten LS-Schalters gesunken ist.

Für Kombinationen von Sicherungen und Schutzschaltern gelten sinngemäß die gleichen Bedingungen. Während der Abschaltung eines nachgeschalteten Leitungsschutzschalters darf z. B. kein Wert $\int i^2 dt$ auftreten, der die Vorsicherung zum Schmelzen bringt.

Die Verhältnisse sind so kompliziert, daß bei zwei verschiedenen Schaltgeräten meistens erst nach einem Versuch gesagt werden kann, ob sie selektiv sind oder bis zu welchem Strom sie selektiv arbeiten. Im Bereich niedriger Überströme, in dem die Lichtbogenzeit gegenüber der Schmelzzeit oder dem Ausschlitzverzug vernachlässigbar klein ist, genügt meistens ein Vergleich der Kennlinien zur Beurteilung der Selektivität, jedoch muß die Streuung der Schaltgeräte berücksichtigt werden. Bei höheren Strömen kann man auf genaue Angaben über das selektive Verhalten der Schaltgeräte nicht verzichten. Für häufig vorkommende Zusammenschaltungen werden deshalb Selektivitätstafeln oder -diagramme heraus-

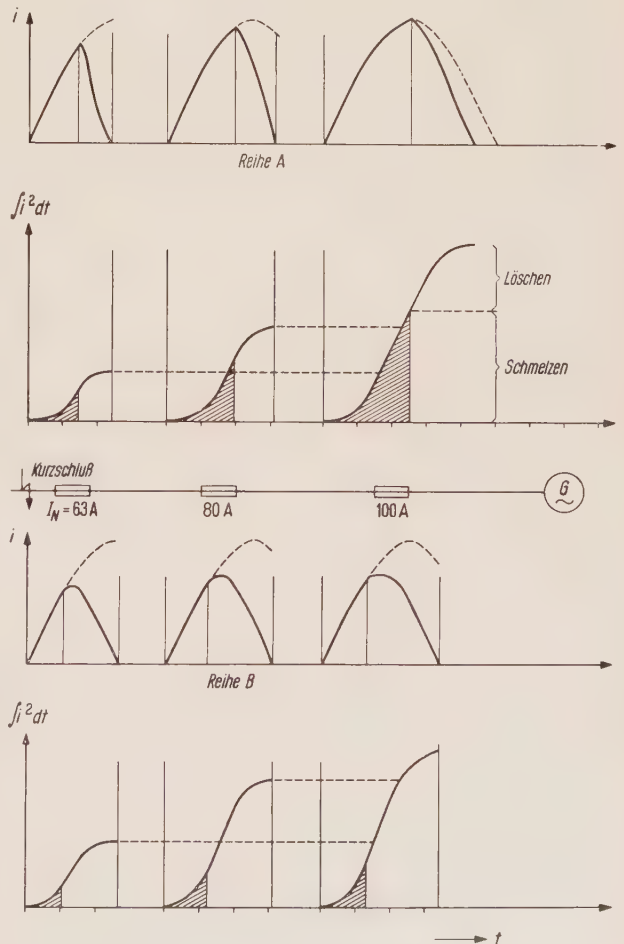


Bild 3 Verhalten von Schmelzeinsätzen im Strahlennetz. Reihe A: selektiv; Reihe B: nicht selektiv

gegeben. Diese Angaben gelten dann immer nur für einen bestimmten Gerätetyp. Andere Geräte, besonders solche verschiedenen Fabrikates, können nach diesen Angaben nicht beurteilt werden.

Reihenschaltung von Leitungsschutzschaltern

LS-Schalter sind Geräte, die bei niedrigen Überströmen thermisch, im Bereich höherer Überströme magnetisch ausgelöst werden. Im thermischen Bereich ist der Ausschaltverzug so groß, daß die Selektivität durch einen Vergleich der Kennlinien ermittelt werden kann. Da jedoch nur bei geringen Überströmen thermisch ausgelöst wird, muß meistens auch die Selektivität im magnetischen Auslösebereich untersucht werden.

Der Ausschaltverzug im magnetischen Bereich ist maßgebend für das Abschaltvermögen des LS-Schalters. Die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten haben meistens das Ziel, den Ausschaltverzug gering zu halten, um den Schaltern ein hohes Abschaltvermögen zu geben. Bisher ist es aber noch nicht gelungen, den Ausschaltverzug so zu verkürzen, daß eine für das selektive Verhalten notwendige Strombegrenzung erreicht werden könnte. Es ist auch unwahrscheinlich, daß dieser Weg bei den derzeitigen Möglichkeiten erfolgreich beschritten werden kann. Wenn LS-Schalter selektiv gestaffelt werden sollen, so müssen die Ausschaltverzugszeiten bei Schaltern größeren Nennstromes verlängert werden, wodurch sich ihr Schaltvermögen verringert. Da ihre Schaltleistung aber mindestens so groß sein muß wie die von Schaltern geringen Nennstromes, müssen sie auch mindestens ebenso rasch auslösen. LS-Schalter können also im Bereich, in dem beide Schalter magnetisch auslösen, nicht selektiv sein. Es ist daher praktisch nicht möglich, Leitungsschutzschalter in Reihe zu schalten, ohne daß auf selektives Abschalten im Bereich höherer Überströme verzichtet wird.

Reihenschaltung von Schmelzsicherungen

Wie erwähnt, sind Schmelzsicherungen dann selektiv, wenn der Wert $f i^2 d t$ der vorgeschalteten Sicherung für die Schmelzzeit allein größer ist als der $f i^2 d t$ -Wert der nachgeschalteten Sicherung für die gesamte Abschaltung. Sicherungen einer Baureihe sind nur dann selektiv, wenn die $f i^2 d t$ -Werte für die Schmelzzeit der einzelnen Nennstromstufen weit gestaffelt sind und die entsprechenden Löschwerte klein sind.

Bild 3 enthält die Werte $f i^2 d t$ für verschiedene Schmelzeinsätze beim Abschalten eines hohen Kurzschlußstromes. Die Diagramme zeigen, daß Schmelzeinsätze der Reihe A einen verhältnismäßig hohen Schmelzanteil, Schmelzeinsätze der Reihe B einen hohen Löschanteil am Gesamtwert $f i^2 d t$ haben. Selektiv können nur Schmelzeinsätze der Reihe A sein. Schmelzeinsätze der Reihe B sind nach ihrem Oszillogramm für eine selektive Staffelung nicht geeignet.

Der Schmelzanteil des Wertes $f i^2 d t$ ist im Kurzschlußgebiet für jede Sicherung konstant. Dieser Anteil läßt sich aus der Größe der Engstellen des Schmelzleiters unter der Voraussetzung errechnen, daß während der Schmelzzeit Wärme weder im Schmelzleiter wandert noch an die Umgebung abgegeben wird [1, 2]. Innerhalb einer selektiven Sicherungsreihe müssen demnach die Engstellen des Schmelzleiters gut gestaffelt sein.

Der Löschanteil des Wertes $f i^2 d t$ wird weitgehend von der Spannung, der Induktivität und dem Kurzschlußstrom bestimmt. Die Sicherung beeinflusst den $f i^2 d t$ -

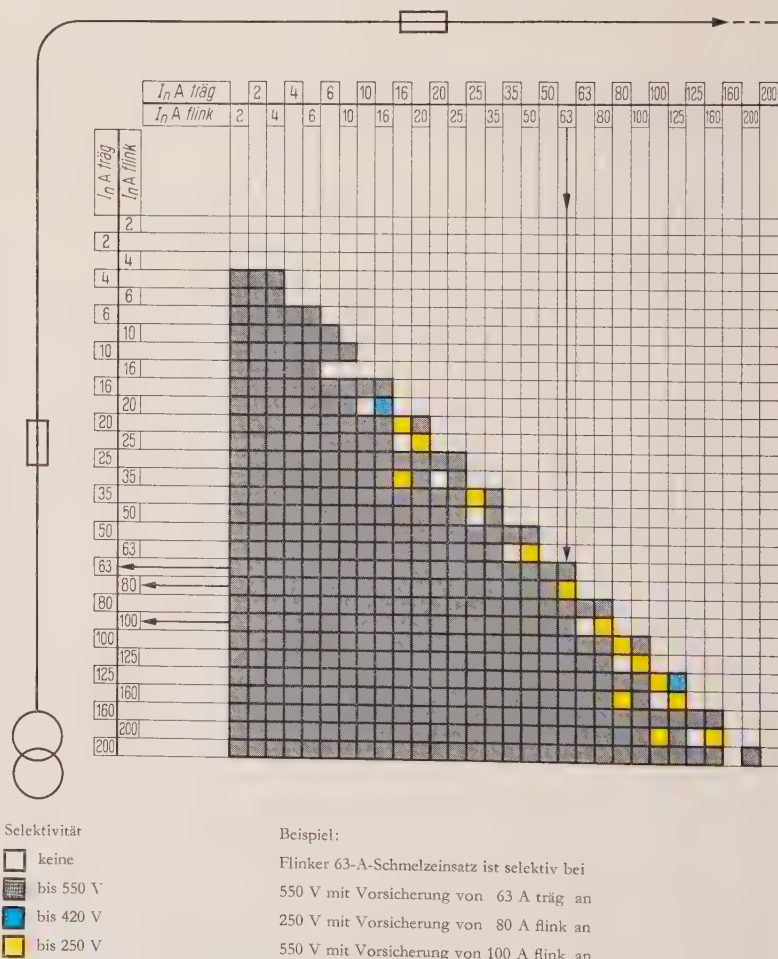


Bild 4 Selektivität von Siemens-SD-Schmelzeinsätzen 500 V flink (Dz) und trög (TDz)

Wert durch die Größe und den Verlauf der Brennspannung des Lichtbogens. Bei Siemens-SD-Schmelzeinsätzen steigt die Bogenspannung unmittelbar nach dem Unterbrechen des Schmelzleiters steil bis über den Wert der treibenden Spannung und führt den Strom von seinem Augenblickswert im Zeitpunkt der Schmelzleiterunterbrechung rasch auf Null [3, 4]. Wegen des schnellen Stromrückgangs während der Löschzeit ist der Löschanteil des Wertes $\int i^2 dt$ gering, so daß auch die zweite Voraussetzung für gute Selektivität innerhalb einer Schmelzeinsatzreihe erfüllt ist.

Bei Wechselstrom mit konstantem Effektivwert des Kurzschlußstromes und konstantem Wert des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ ergibt sich für verschiedene Einschaltwinkel ψ ein unterschiedlicher Verlauf der treibenden Spannung und des Stromes während der Schmelzzeit. Der Schmelzanteil des Wertes $\int i^2 dt$ ist hier auch bei hohen Kurzschlußströmen und kurzen Schmelzzeiten noch konstant. Der Löschanteil ist jedoch, abhängig vom Einschaltwinkel ψ , sehr unterschiedlich, weil die Bogenspannung je nach dem Verlauf der treibenden Spannung unterschiedlich hoch über der treibenden Spannung liegt und dadurch zu verschieden großem Stromrückgang während der Löschzeit führt.

Bild 4 zeigt die Selektivität von Siemens-SD-Schmelzeinsätzen. Zwei Schmelzeinsatztypen gelten dann als selektiv, wenn die vorgeschaltete Sicherung drei kurz aufeinanderfolgende Abschaltungen einer bestimmten Sicherungsreihe ohne merkliche Alterung des Schmelzleiters verträgt. Die Selektivitätsversuche wurden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Wechselspannung	Kurzschlußstrom (Effektivwert)	Leistungsfaktor $\cos \varphi$
550 V	20 kA	0,3
420 V	20 kA	0,3
250 V	30 kA	0,3

Dem Diagramm kann die Selektivität der flinken und trägen Siemens-SD-Schmelzeinsätze auch für den Fall entnommen werden, daß beide Baureihen gemischt eingesetzt werden. Im einzelnen lassen sich folgende Regeln ableiten:

- a) Siemens-SD-Schmelzeinsätze sind bis 250 V innerhalb einer Typenreihe von Nennstromstufe zu Nennstromstufe selektiv.

Ausnahmen: flinke Sicherungen 2 A mit 4 A
10 A mit 16 A
träge Sicherungen 160 A mit 200 A

- b) Wenn ein träger Schmelzeinsatz vorgeschaltet wird, ist er mit einem flinken für gleichen Nennstrom selektiv.

Ausnahme: 2 A

- c) Wenn ein flinker Schmelzeinsatz vorgeschaltet wird, so ist er mit einem um drei Nennstromstufen schwä-

cheren trägen Schmelzeinsatz selektiv, z. B. Dz II 25 mit TDz II 10.

Diese Regel gilt ohne Ausnahme.

Die guten selektiven Eigenschaften der DIAZED*-Schmelzeinsätze ermöglichen auch in weitverzweigten Netzen störungsfreien Betrieb. Die Selektivität bleibt auch dann erhalten, wenn die einzelnen Schmelzeinsätze unterschiedlich stark vorbelastet sind.

Reihenschaltungen von Sicherungen und LS-Schaltern

LS-Schalter werden nicht vor Sicherungen eingesetzt, weil sonst die Sicherungen häufiger ansprechen würden als die Schalter und deren Vorzug – praktisch unbeschränkte Benutzungsdauer – nicht mehr ausgenutzt werden könnte. Selektivität ließe sich bei dieser Kombination auch kaum verwirklichen, weil die Sicherung den Strom

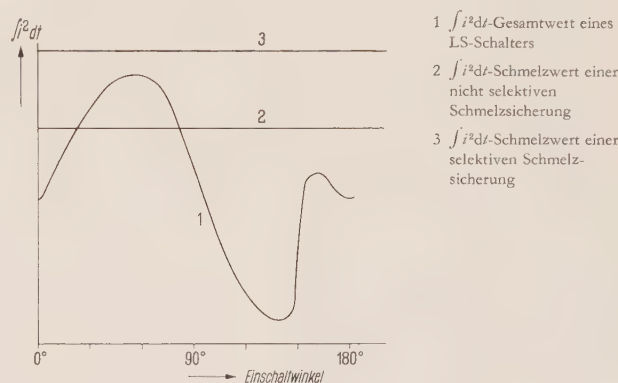


Bild 5 Abhängigkeit des Wertes $\int i^2 dt$ vom Einschaltwinkel bei Schmelzsicherungen und Leitungsschutzschaltern

auf einen Wert begrenzen müßte, der unterhalb des Auslösestromes des LS-Schalters liegt. Dies ist für die in der Installationstechnik gebräuchlichen Sicherungsnennströme nicht möglich.

Entsprechend der Vorschrift VDE 0100 § 31 Nd 2 sind Sicherungen immer vor LS-Schaltern anzuordnen. Selektivität besteht hier, wenn der während der Abschaltung des LS-Schalters auftretende Wert $\int i^2 dt$ den entsprechenden Schmelzwert der Sicherung nicht übersteigt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Wert $\int i^2 dt$ beim Abschalten durch einen Leitungsschutzschalter sehr stark von der Höhe der Netzspannung, vom Einschaltaugenblick, bezogen auf die Spannungshalbwelle, und auch vom Leistungsfaktor abhängig ist, wogegen der Schmelzwert $\int i^2 dt$ einer Sicherung praktisch konstant ist. Für die Selektivitätsversuche muß bei einer bestimmten Stromkreisordnung jeweils der höchste mögliche Wert für $\int i^2 dt$ herangezogen werden (Bild 5). Für den Schalter

* Eingetragenes Warenzeichen

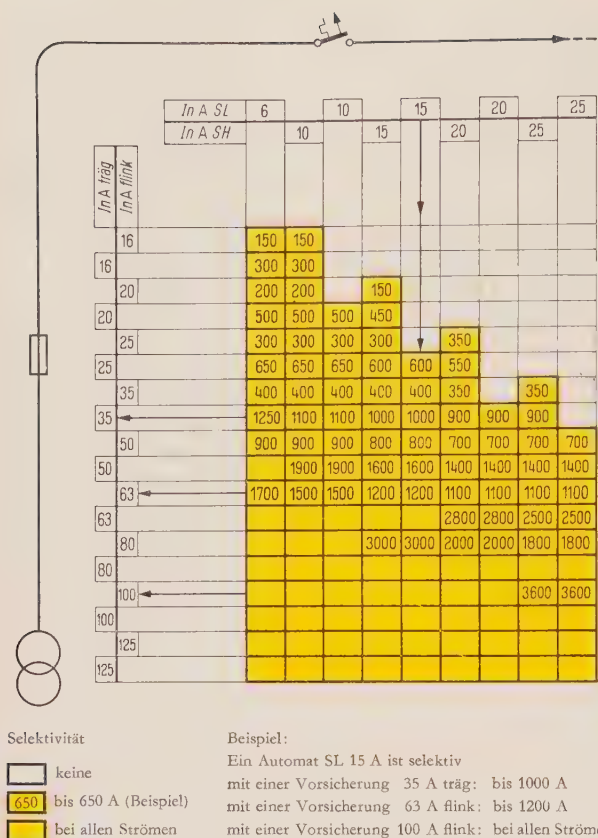


Bild 6 Selektivität von Siemens-Leitungsschutzschaltern (SL, SH) mit Siemens-SD-Schmelzeinsätzen 500 V flink (Dz) und träge (TDz) bei 250 V Wechselstrom

bedeutet die Selektivitätsbedingung, daß angestrebt werden muß, den Wert für $\int i^2 dt$ so weit wie möglich zu senken. Dies ist ohnehin das Ziel der Entwicklungsarbeiten, weil damit im allgemeinen das Abschaltvermögen gesteigert wird.

Unter eine gewisse Grenze kann jedoch der $\int i^2 dt$ -Wert des Schalters nicht gebracht werden, weil in seinen mechanisch bewegten Teilen eine nicht vernachlässigbare Zeit für das Öffnen der Kontakte und den Aufbau des Lichtbogens benötigt wird und die Lichtbogen-Spannung nicht beliebig hoch gewählt werden kann. Beim Bau der als Vorsicherung vorgesehenen Schmelzeinsätze wird deshalb der Schmelzwert $\int i^2 dt$ so groß gewählt, daß für den Abschaltvorgang des Schalters genügend Sicherheit bleibt. Bild 6 zeigt das Ergebnis von Selektivitätsversuchen bei 250 V Wechselspannung. Als LS-Schalter wurde die Bauart S verwendet, als Vorsicherung träge und flinke DIAZED-Schmelzeinsätze. Aus dem Bild ist ersichtlich, bis zu welchen Strömen Siemens-Leitungsschutzschalter Typ S und träge und flinke Schmelzeinsätze selektiv sind. Die Angaben gelten für den magnetischen Bereich der Schalterauslösung. In jedem Fall muß noch durch Vergleich der Strom-Zeit-Kennlinien ermittelt werden, ob sich die Kennlinien im Bereich der thermischen Auslösung überschneiden. Dies ist bei den verschiedenen Schalterarten mit H-, L- und G-Charakteristik unterschiedlich. Träge Schmelzeinsätze für mehr als 63 A Nennstrom sind mit LS-Schaltern in deren gesamtem Anwendungsgebiet selektiv.

Wie das Diagramm zeigt, können schon träge DIAZED-Schmelzeinsätze für verhältnismäßig geringen Nennstrom als Vorsicherungen für Leitungsschutzschalter verwendet werden.

Schrifttum

- [1] Rüdenberg, R.: Elektrische Schaltvorgänge. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953, 305 bis 314
- [2] Rauch, W.: Kurzschlußstrombegrenzung bei der Gleichstromabschaltung durch Schmelzeinsätze. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 674 bis 678
- [3] Rauch, W.: Strombegrenzung bei der Abschaltung von Wechselstrom-Kurzschlüssen durch Sicherungen. ETZ-A 80 (1959) 543 bis 547
- [4] Henselmeyer, G. und Rauch, W.: Neue DIAZED-Schmelzeinsätze. ETZ-B 7 (1955) 121 bis 124

Der Germanium-Mesatransistor

VON HEINZ DORENDORF UND HANS REBSTOCK

Seitdem Transistoren gefertigt werden, ist man bemüht, ihre Hochfrequenz-Eigenschaften zu verbessern. Während noch vor wenigen Jahren die obere Frequenzgrenze für die Verwendung von Transistoren bei 50 MHz lag, wurden in neuerer Zeit maximale Oszillationsfrequenzen von 3 GHz erreicht.*

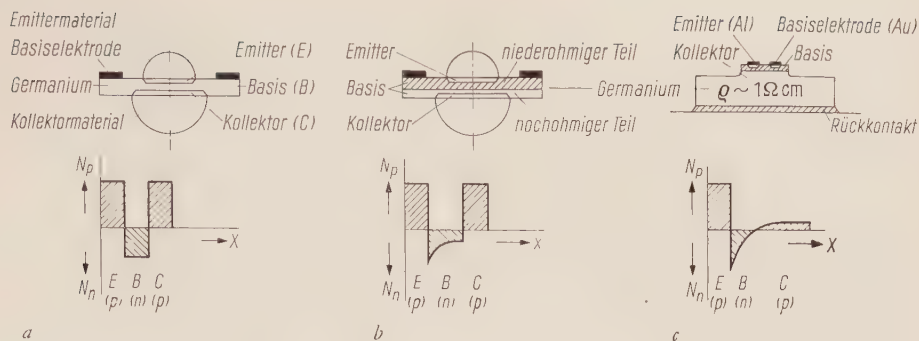
* Nach neueren Untersuchungen von V. W. VODICKA und R. ZULEEG ist eine Verwendung von Mesatransistoren noch oberhalb ihrer maximalen Oszillationsfrequenz in besonderen Fällen möglich [1].

Schon sehr bald wurde erkannt, daß zur Verbesserung der Hochfrequenz-Eigenschaften

- a) die Laufzeiten der Minoritätsträger vom Emitter zum Kollektor (t_{EC}),
- b) die Kapazitäten von Kollektor (C_C) und Emitter (C_E) und
- c) die ohmschen Bahnwiderstände (besonders der Basis-Ausbreitungswiderstand $r_{BB'}$) im Transistor

- a Legierungstransistor
b Drifttransistor
c Mesatransistor

Bild 1 Schematischer Schnitt und Störstellenprofil der Dotierung verschiedener Transistortypen (pnp)



herabgesetzt werden müssen. Nach der Shockleyschen Theorie [2] ist die Laufzeit in der Basis gegeben durch:

$$t_{EC} = \frac{w^2}{2 D_m} \quad (1)$$

mit w Basisdicke und D_m Diffusionskonstante der Minoritätsträger in der Basis. Wie aus Gleichung (1) folgt, ist zur Verkleinerung der Laufzeit t_{EC} die Basisdicke w zu verringern. Bei Legierungstransistoren (Bild 1a) betragen die kleinsten Basisdicken, die technologisch noch zu beherrschen sind, etwa 5 bis 10 μm . Die Verkleinerung der Basisdicke hat jedoch ein Ansteigen des Basisausbreitungswiderstandes $r_{BB'}$ zur Folge, was sich wiederum nachteilig auf die HF-Eigenschaften auswirkt. Unter bestimmten Anpassungsbedingungen ist in einem Frequenzbereich von 0,05 bis $2f_\alpha$ (f_α Grenzfrequenz der Stromverstärkung in Basisschaltung bei $\alpha = 0,7 \alpha_0$) die optimale Leistungsverstärkung $V_{L \text{ opt}}$ gegeben durch [3]:

$$V_{L \text{ opt}} \approx \frac{1}{16 \pi^2 f^2} \frac{1}{t_{EC} r_{BB'} C_C} \approx \frac{1}{8 \pi f^2} \frac{f_\alpha}{r_{BB'} C_C} \quad (2)$$

f Meßfrequenz

Die Erhöhung von $r_{BB'}$ mit dünnerer Basisschicht beeinflusst also die maximale Leistungsverstärkung in ungünstiger Weise. Man kann zwar $r_{BB'}$ auch bei dünner Basis klein halten, indem man die Basis höher dotiert, doch ist damit ein Ansteigen von C_C und ein Abfall der Sperrspannungen sowie der sogenannten Emittierergiebigkeit* verbunden. Dies ist nicht erwünscht.

Neben der optimalen Leistungsverstärkung bei hohen Frequenzen ist das Eigenrauschen des Transistors ebenso wichtig, da es für die Eingangsempfindlichkeit der

mit ihm bestückten Verstärker wesentlich ist. Eine Untersuchung von J. M. STEWART [4] führt hier ebenfalls auf die Forderungen a), b) und c) sowie die üblichen Zusatzforderungen an gute Transistoren, wie hohe Niederfrequenz-Stromverstärkung und kleine Sperrströme.

Einen großen Fortschritt in der Herstellung dünnster Basisschichten (w klein) brachte die Einführung der Diffusionstechnik. Durch Diffusion lassen sich Basisschichten bis herab zu 0,5 μm Dicke gut reproduzierbar herstellen. Diese durch Diffusion von Störstellen hergestellten Basisschichten haben außerdem noch einige andere für HF-Transistoren sehr günstige Eigenschaften. Die Dotierung ist über die Basis nicht gleichmäßig verteilt, sondern nimmt vom Emitter zum Kollektor hin ab (Drifttransistor, s. Bild 1b). Damit kann man $r_{BB'}$ und C_C klein halten und trotzdem am Kollektor hohe Sperrspannungen erzielen. Dieser Dotierungsgradient in der Basis erzeugt außerdem ein zusätzliches Driffeld, das die Laufzeit t_{EC} auf $1/2$ bis $1/8$ verkürzen kann [5].

Bei sehr kleinen Minoritätsträgerlaufzeiten in der dünnen Basis kann sich die Umladungszeit der Emittersperrschichtkapazität C_{EB} bemerkbar machen. Anstelle von Gleichung (1) ist dann genauer zu schreiben [6]:

$$t_{EC} = \frac{w^2}{2 D_m} + \frac{kT}{q I_E} C_{EB} \quad (3)$$

q Elementarladung

k Boltzmannsche Konstante

T Absolute Temperatur

Das zweite Glied berücksichtigt die kapazitive Überbrückung der Emittersperrschicht und wird besonders bei kleinen Emitterströmen I_E wirksam. Es kann durch eine kleine Emitterkapazität C_{EB} klein gehalten werden. Dieser Sachverhalt ist der Hauptgrund für die bei HF-Transistoren mit steigendem Strom I_C zunehmende Grenzfrequenz.

Zur Erreichung kleiner Kapazitäten C_{CB} und C_{EB} (eingangs genannte Forderung b) müssen naturgemäß die betreffenden Flächen klein sowie die Dotierungen an den Sperrschichten möglichst gering gehalten werden,

* Die Emittierergiebigkeit, d. h. der Prozentsatz des Emitterstromes I_E , der aus Minoritätsträgern besteht, ist beim legierten pnp-Transistor

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_B w}{\sigma_E L_{nE}}}$$

Hierbei bedeuten σ_B und σ_E die Leitfähigkeit der Basis- bzw. Emittierzzone, w die Basisdicke und L_{nE} die Diffusionslänge der Elektronen in der Emitterschicht.

soweit dies im Rahmen anderer Forderungen, z.B. hinsichtlich Sperrspannungen, möglich ist.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, daß im wesentlichen zwei Maßnahmen zu guten HF-Eigenschaften führen:

1. Verkleinern der geometrischen Abmessungen (dünne Basis, kleiner Querschnitt von Emitter und Kollektor).
2. Erzeugen bestimmter Störstellenprofile durch Diffusion in der Basiszone.

Prinzip des Germanium-Mesatransistors (pnp)

Ein Herstellungsverfahren für HF-Transistoren, bei dem diese Forderungen in konsequenter Weise berücksichtigt sind, wurde 1956 von C. A. LEE [7] angegeben.

Bild 1c zeigt eine schematische Darstellung dieses »basisdiffundierten Germanium-Transistors«. Da die Gestalt des Transistors einem Tafelberg ähnelt, hat sich für diese Art von Transistoren in den USA der Name Mesa-Transistor (»mesa« = span. Tisch, Tafelberg) eingebürgert. Die Basis ist durch Diffusion hergestellt, der Emitter E besteht aus aufgedampftem und einlegiertem Aluminium (p-Dotierung), der Basisanschluß B aus Gold-Antimon (n-Dotierung). Die Mesastruktur wird zum Schluß durch Ätzen erzeugt.

LEE [7] erreichte schon α -Grenzfrequenzen von $f_\alpha = 500$ MHz. Inzwischen sind weitere Arbeiten aus den Bell-Laboratorien erschienen [8, 9, 10]. TALLEY [8] beschreibt bereits verschiedene Typen für verschiedene Anwendungszwecke (Verstärker, Schalter, Oszillator). Durch bestimmte Wahl der Basisdicke, Basisdotierung und Geometrie der Streifen kann man den Transistor leicht einem bestimmten Anwendungszweck anpassen. EARLY [10] stellt Betrachtungen an über die theoretisch mit Germanium-Mesatransistoren erreichbare Grenzfrequenz. Er errechnet eine maximal mögliche Oszillationsfrequenz $f_{Oz\ max}$ von 10 GHz. Für einen Frequenzbereich von einigen 100 MHz bis 1 GHz stellen heute verschiedene amerikanische [11] und japanische

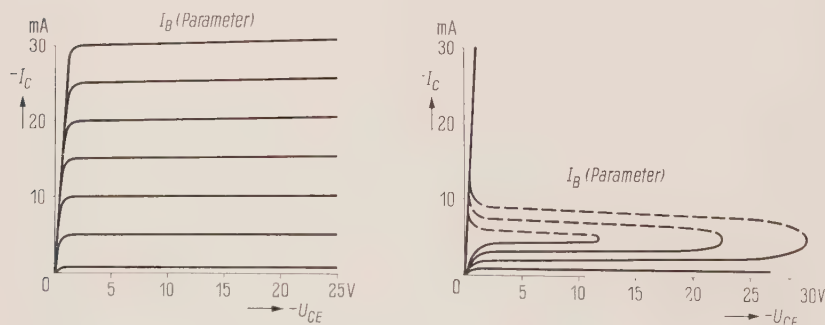
Firmen, sowie in Deutschland Siemens & Halske, Germanium-Mesatransistoren her.

Neben den hohen Arbeitsfrequenzen, die mit Mesa-Transistoren erreichbar sind, können mit ihnen trotz der winzigen Systeme verhältnismäßig große HF-Leistungen erzielt werden, da bei einer Montage des Systems unmittelbar auf die Grundplatte des Gehäuses eine sehr gute Wärmeableitung möglich ist. Das Mesaprinzip eignet sich daher sowohl für höchste Frequenzen als auch für HF-Leistungstransistoren, für letztere besonders dann, wenn man für die Elektroden Mäanderstrukturen verwendet und damit die entstehende Verlustleistung auf eine größere Fläche verteilt.

Beim pnp-Germanium-Mesatransistor wird, wie erwähnt, die Basisschicht durch Diffusion, der Emitter durch Einlegierung hergestellt. Während der legierte Transistor (s. Bild 1a) von beiden Seiten je eine Einlegierungsfront erhält, werden die beiden Sperrschichten Emitter/Basis und Basis/Kollektor beim Mesaprinzip (s. Bild 1c) von einer Seite her aufgebaut. Dies hat den großen Vorteil, daß Schwankungen der Dicke der Ausgangsscheiben, die sich im Bereich von $1/1000$ mm nie vermeiden lassen, keine Rolle spielen. Dies ist die Vorbedingung für die Beherrschung dünnster Basisschichten in der Größenordnung von $1\ \mu\text{m}$.

Um die Emitterkapazität klein zu halten, muß man die Abmessungen des Emitters soweit verkleinern, daß der Emitter schmäler als die halbe Dicke eines menschlichen Haares wird. Durch Verwendung von Aluminium als Material der Emitterdotierung – es liefert sehr hohe Störstellenkonzentration – kann man die Störstellenkonzentration der Basis auf der Emitterseite weiter anheben als bei den üblichen mit Indium oder Indium/Gallium dotierten Legierungs-Drifttransistoren, ohne die Emitterergiebigkeit (s. Fußnote Seite 603) zu sehr zu verringern. Diese hohe Basisdotierung ermöglicht dann auch für dünnste Basisdicken noch günstige Basisausbreitungswiderstände, die im wesentlichen durch den Widerstand der dünnen Schicht und somit ihr Störstellenprofil gegeben sind.

Die Kollektorkapazität C_C bleibt dadurch klein, daß die Fläche der Kollektorinsel (Mesa) in der Größenordnung von $10^{-2}\ \text{mm}^2$ gehalten wird und der spez. Widerstand des Germaniums (Kollektor) entsprechend hoch gewählt wird. Vom Standpunkt der Kollektorkapazität und der Sperrspannung könnte der spezifische Widerstand des Grundgermaniums nicht hoch genug sein, doch stören bei hohen Frequenzen der Kollektorbahnwiderstand (Begrenzung der Aussteuerbarkeit zu hohen Strömen)



Kennlinienfeld des Transistors (schematisch)

Kennlinienfeld des Vierschichters (schematisch)

Bild 2 Vergleich des Kennlinienfeldes eines Mesatransistors mit dem eines Vierschichters (»Thyristor«)

und die Schwierigkeit, bei hochohmigem Material den sperrfreien Kontakt am Grundmaterial völlig injektionsfrei zu machen. Gelingt dies nämlich nicht vollständig, so werden vom Rückkontakt ebenfalls Minoritätsträger injiziert, die bei gutem Halbleitermaterial (hohe Trägerlebensdauer) den Kollektor erreichen können, wodurch dann der Transistor zu einem sogenannten Vierschichter geworden ist. Das normale Kennlinienfeld geht dann in eine Schaltcharakteristik über (Bild 2).*

Es hat sich bald herausgestellt, daß bei Mesatransistoren unterschiedliche Typen verwendet werden müssen, je nachdem, ob der Transistor für Verstärkerzwecke oder als schneller Schalter dienen soll, da sich beste Schalteigenschaften nicht mit höchster HF-Leistungsverstärkung vereinbaren lassen. Im folgenden wird nur auf die Verstärkertransistoren eingegangen.

Herstellungsverfahren des Mesatransistors (Verstärkertyp)

Als Ausgangsmaterial dient ein aus der Schmelze gezogener p-leitender Germaniumeinkristall vom spezifischen Widerstand $\rho = 1 \Omega \text{cm}$, der zersägt und poliert wird. Die entstehenden Scheiben werden nach einer sorgfältigen Oberflächenbehandlung im Dampf eines Donators (etwa Arsen oder Antimon) erhitzt, wodurch sich bei einer Temperatur von 600 bis 700 °C eine eindiffundierte n-leitende Schicht der Stärke 1 bis 2 μm bildet (Einwirkungszeit je nach Temperatur und Dampfdruck zwischen 20 und 80 min). Nun werden im Hochvakuum (10^{-5} Torr) durch geeignete Masken – deren Herstellung ein besonderes Problem ist – auf einer Scheibe Emitter- und Basiskontakte für einige hundert Transistoren aufgedampft und einlegiert (Bild 3a; jeder Einzelfleck besteht schon aus Emitter und Basis, s. Bild 3b). Zur Herstellung der beiden Flecke im geforderten Abstand von etwa 10 bis 15 μm (Fleckengeometrie bei den Siemens-Transistoren AFY 11 beträgt z.B. 30 $\mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$) sind zwei Verfahren anwendbar. Entweder dampft man von zwei verschiedenen Verdampferquellen aus durch eine

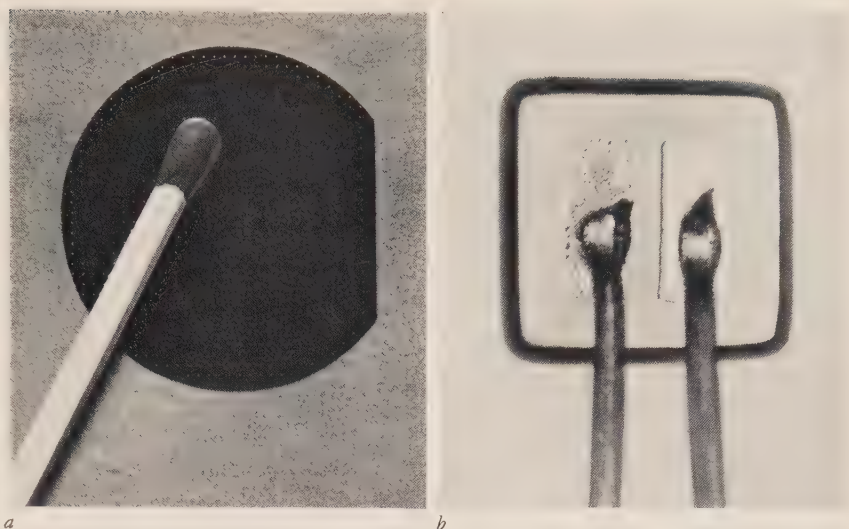


Bild 3 a Germaniumscheibe mit aufgedampften Systemen. Jeder einzelne der kleinen Flecke besteht aus zwei Teilflecken (s. Bild rechts). b Kontaktiertes Einzelsystem; rund um den aufgedampften Emitter- und Basiskontakt ist die Kollektorinsel (»Mesa«) zu erkennen. Die Breite eines jeden der beiden Aufdampfflecke Emitter und Basis liegt unter der halben Breite eines menschlichen Haars

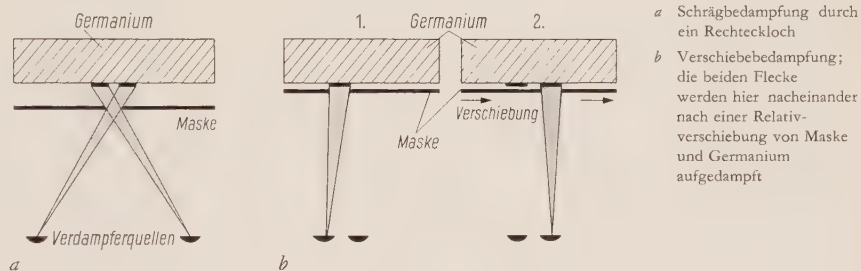


Bild 4 Schematische Darstellung verschiedener Aufdampfverfahren

Blendenöffnung auf das in einem bestimmten Abstand angebrachte Germanium (Schrägbedampfung, Bild 4a), oder man verschiebt nach der Bedampfung des einen Flecks die Maske relativ zum Germanium und bedampft dann den zweiten Fleck (Verschiebebedampfung, Bild 4b).

Nachdem so Basisanschluß und Emitter aufgedampft und einlegiert wurden, muß die Kollektorinsel (»Mesa«) herausgearbeitet werden. Hierfür kommen nur chemische oder elektrolytische Ätzverfahren in Betracht, wobei während der Ätzung der Bereich der Mesa gegen den Ätzangriff durch eine geeignete Abdeckung geschützt werden muß. Nach Ablösung dieser Schutzschicht ist dann die endgültige Mesastruktur entstanden.

Erst jetzt werden die Scheiben zerschnitten und die einzelnen Plättchen, deren jedes eine Mesa trägt, auf die Systemträger aufgelegt. Dies kann entweder unmittelbar auf der Grundplatte (Vorteil der guten Wärmeableitung und damit höherer Verlustleistung) oder gegen die Grundplatte isoliert vorgenommen werden. Bei isoliertem Auf-

* Zuweilen werden nach diesem Prinzip aufgebaute Mesatransistoren mit zwei stabilen Arbeitspunkten nach dem Mesaprinzip als »Thyristoren« bezeichnet [12] und als schnelle Schalter auch in den Handel gebracht.

bau liegt der Kollektor nicht am Gehäuse, was für manche HF-Anwendungen von Vorteil ist. Die Siemens-HF-Leistungstransistoren AFY 10/11 sind daher sinngemäß unisoliert aufgebaut, die Vorstufentransistoren AF 106 und AFY 12 jedoch isoliert. Für das Auflegieren werden bei Germanium-Mesatransistoren im allgemeinen Goldlegierungen verwendet, da die üblichen Auflötungen mit Pb, Sn- oder In-haltigen Legierungen bei zu niedrigen Temperaturen wieder flüssig werden, was bei der folgenden Kontaktierung der Aufdampfflecke stören kann.

Die Kontaktierung der Aufdampfflecke wird mit Hilfe des Verfahrens der sogenannten »thermocompression« [13] bewerkstelligt, das den für Halbleiterkontakte sehr wichtigen Vorzug hat, daß es ohne die Verwendung von Fluß- oder Lötmitteln durchgeführt werden kann. Hierzu wird ein dünner Golddraht (Durchmesser 10 bis 15 μm) bei einer Temperatur von etwa 300 °C mit einem kleinen Keil auf dem Aufdampffleck festgedrückt. Durch plastische Verformung des Golddrahtes kann eine solch innige Verbindung erreicht werden (eine Art Kaltverschweißung), daß bei zu starker Zugbeanspruchung eher der Draht reißt als daß sich die Verbindung wieder löst. Druck und Temperatur sind dabei so zu wählen, daß weder plastische Verformung noch Sprödbruch des Germaniums eintritt, was eine Beschädigung der extrem dünnen Schichten zur Folge hätte. Naturgemäß muß die Bildung einer flüssigen Phase verhindert werden, die in unkontrollierbarer Weise die dünnen Schichten beeinflussen würde. Bild 3b zeigt ein kontaktiertes System; die Länge eines Aufdampfflecks entspricht etwa der Dicke eines menschlichen Haares. Schließlich wird der Transistor verschlossen, nachdem er nach Ausheizen im Vakuum mit einem Schutzgas oder einem Fett gefüllt wurde. Eine Voralterung bei erhöhter Temperatur schließt den Herstellungsgang ab.

Dies alles hat zur Folge, daß einerseits der Mesatransistor sehr sauber aufgebaut und Abschlußbehandlungen der Oberfläche unterworfen werden kann, die sich bei legierten Transistoren meistens nicht durchführen lassen. Es ist nämlich eine Vakuumausheizung möglich, da die verwendeten, am niedrigsten schmelzenden Verbindungen im Gegensatz zu legierten Germanium-Transistoren erst oberhalb 350 °C flüssig werden. Außerdem enthält der Mesatransistor keine Metalle wie Pb, Sn u. ä., die bei Ätzprozessen leicht in Lösung gehen und die Germanium-Oberflächen verschmutzen. Es ist bekannt, daß dies für die Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb von Bedeutung ist.

Ganz im Gegensatz zum ersten Anschein sind die Mesatransistoren bemerkenswert robust. Lediglich der dünne Draht setzt der Belastbarkeit bei etwa 100 bis 200 mA eine Grenze.

Trotz der hochempfindlichen und an Geräten aufwendigen Arbeitsvorgänge ist der Mesatransistor wirtschaftlich herzustellen, da fast alle teuren Arbeitsgänge Massen-

vorgänge sind, die für mehrere hundert, ja tausend Transistorsysteme gleichzeitig durchgeführt werden.

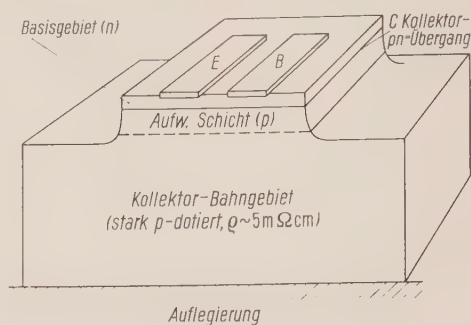
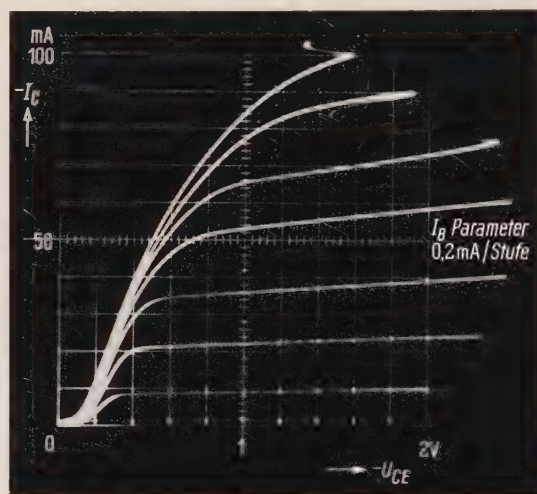
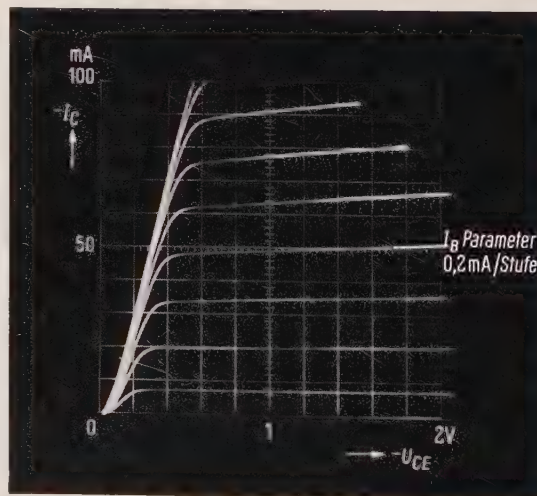


Bild 5 Schematischer Schnitt durch einen epitaxialen Mesatransistor. Zwischen dem sehr hochdotierten Kollektorgrundmaterial und dem Kollektor-pn-Übergang befindet sich eine niedrigdotierte hochohmige Zwischenschicht



Normaler Mesatransistor (V 118)



b Epitaxialer Mesatransistor (V 125) mit wesentlich verringerter Restspannung

Bild 6 Vergleich der Kennlinienscharen eines normal aufgebauten und eines epitaxial aufgebauten Germanium-Mesatransistors

Neuere Entwicklungen (Epitaxie)

Zum Abschluß dieser Betrachtungen sei noch auf eine Weiterentwicklung der Mesatransistoren eingegangen, die für höchste Frequenzen, für Transistoren höherer Leistungen sowie vor allem zum Erreichen kürzester Schaltzeiten bei Schalttransistoren von Bedeutung ist.

Bild 1c läßt erkennen, daß sich der Mesatransistor durch ein verhältnismäßig hochohmiges Kollektorbahngebiet von legierten Transistoren unterscheidet. Diese Zone würde man gerne vermeiden, wenn sie nicht zur Erreichung einer hinreichend hohen Kollektorsperrspannung sowie einer kleinen Kollektorkapazität C_{CB} notwendig wäre. Mindestens soll sie jedoch möglichst dünn sein. Da es technologisch sehr schwer ist, mit Restkollektordicken von etwa 10 bis 20 μm zu arbeiten, geht man in neuerer Zeit für extreme Ansprüche zu einer Schichtstruktur über (Bild 5). Man verwendet ein sehr hochdotiertes, fast metallisch leitendes Trägermaterial (Ge), auf dem man eine verhältnismäßig hochohmige einkristalline Schicht kohärent aufwachsen läßt (Epitaxie).

Ein in dieser Technik hergestellter Verstärkertransistor ist der im nächsten Abschnitt mit einigen Daten angegebene Typ der Versuchsserie V 120, der für Arbeitsfrequenzen bis 1 GHz geeignet ist.

Von besonderer Bedeutung wird jedoch die epitaxiale Technik für Schalttransistoren, da hier eine entscheidende Verringerung der Restspannung zu erreichen ist (vgl. die in Bild 6 abgebildeten Kennlinienscharen der Versuchsmusterserien V 118 und V 125 [epitaxial]). Außerdem gelingt hier eine Verringerung der sogenannten Speicherzeit (»storage-time«) des Schalttransistors. Auf diese Einzelheiten soll jedoch im Rahmen dieser kurzen Übersicht nicht weiter eingegangen werden.

Elektrische Eigenschaften
der Siemens-Mesatransistoren

Als erste nach dieser neuen Technik hergestellten Verstärkertransistoren brachte Siemens & Halske die Germanium-Mesatransistoren AFY 10 und AFY 11 sowie AFY 12 und AF 106 auf den Markt. Die Bezeichnung wurde nach der neuen, nunmehr für Europa einheitlichen Norm festgelegt. Der erste Buchstabe »A« bezeichnet einen Germanium-Transistor, der zweite Buchstabe »F« einen Hochfrequenztransistor, der dritte Buchstabe »Y« weist schließlich auf die kommerzielle Verwendbarkeit des Transistors hin. Die Ziffern sind laufende Nummern und haben keine weitere Bedeutung.

Unter kommerzieller Qualität wird hierbei eine sehr gute Qualität verstanden, wie sie nur bei einer besonders kontrollierten Fertigung unter Verwendung spezieller Behandlungsverfahren erreicht werden kann. Der Qualitätsbegriff bezieht sich hierbei nicht in erster Linie

		AFY 10	AFY 11	AF 106	AFY 12	V 120
Angaben für		V	10	10	12	12
Arbeitspunkt	$-U_{CE}$ $-I_C$	mA	10	10	1	1,5
Frequenz, bei der $\beta = 1$ wird	$f_{\beta=1}$	MHz	330	400	220	220
Maximale Oszillations- frequenz	$f_{Osz\ max}$	MHz	600	750	1000	1000
Optimale Leistungsverstär- kung in Basisschaltung V_{Lopt}						
	100 MHz	dB	16	18		
	200 MHz	dB	10	12	14	14
	800 MHz	dB				10
Stromverstärkung in Emittter- schaltung (bei 1 kHz) β_0			60	60	40	40
Rückwirkungs- Zeitkonstante	$r_{BB'} C_{C'}$	ps	25	20	9	9
Kollektor-Sperrschicht- Kapazität	C_C	pF	1,2	1,2	0,7	0,7
$C_C = C_{C'B'} + C_{C'B}$ ($U_{CB} = 10\text{ V}$)						
Rauschfaktor ($R_g = 60\ \Omega$)			$-U_{CE} = 6\text{ V}$ $-I_c = 2\text{ mA}$			
bei 100 MHz	dB		5,8	4,8		
bei 200 MHz	dB		6,8	6,0	5,5	5,5
bei 800 MHz	dB					10
Kollektor-Basis-Sperrstrom bei 12 V	$-I_{CB0}$	μA	2	2	<10	<3
Grenzdaten						
Kollektor- sperrspannung	$-U_{CB0}$	V	30	30	25	25
Emittersperrspannung ($-I_{EB0} = 100\ \mu\text{A}$)	$-U_{EB0}$	V	1	1	0,3	0,5
Kollektorstrom	$-I_C$	mA	70	70	10	10
Verlustleistung bei Umgebungstemperatur 45 °C		mW	180	180	30	30
Gehäusetemperatur 45 °C		mW	500	500		

Tafel 1 Charakteristische Daten der Siemens-Germanium-Mesatransistoren (Versuchsmuster V 120 z. Z. noch nicht erhältlich)

auf die üblichen Daten, sondern kennzeichnet eine besonders hohe Zuverlässigkeit (»reliability«) bei Dauerbelastung. Diese Eigenschaft gewinnt bei der immer größer werdenden Anzahl von Bauelementen, wie sie z. B. neuzeitliche Datenverarbeitungsgeräte enthalten, eine ständig wachsende Bedeutung.

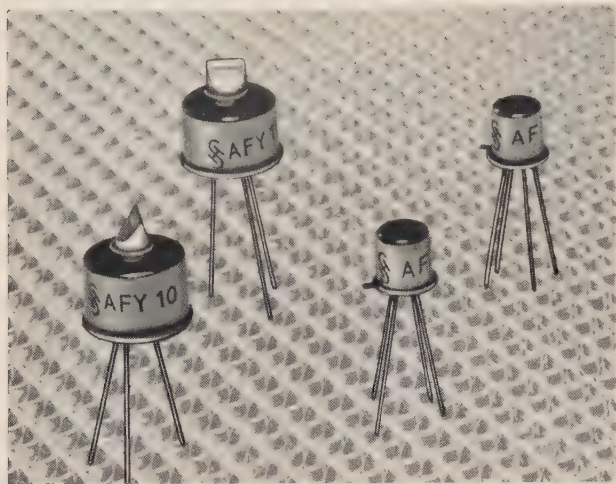


Bild 7 Die Siemens-Germanium-Mesatransistoren AFY 10, AFY 11, AF 106 und AFY 12 (doppelte Größe)

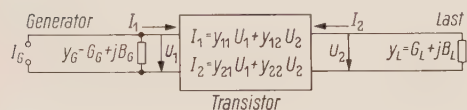


Bild 8 Vierpoldarstellung eines Transistors in Y-Parametern

In Tafel 1 sind die wichtigsten Daten der schon erhältlichen Typen sowie des Versuchsmusters V 120 aufgeführt. Die Typen AFY 10/11 sind HF-Transistoren

für verhältnismäßig hohe Verlustleistungen, sie sind daher unisoliert – mit Kollektor am Gehäuse – aufgebaut (Bild 7). Die zulässige Verlustleistung beträgt, je nachdem, ob die Umgebungstemperatur oder das Gehäuse auf 45°C gehalten werden, 180 mW bzw. 500 mW. Im Gegensatz dazu sind die Typen AFY 12 und AF 106 isoliert aufgebaut und besonders für Kleinsignalverstärker, z.B. in UKW- oder Fernsehvorstufen, bis 300 MHz gedacht. Die Verlustleistung beträgt hier 30 mW bei 45°C Umgebungstemperatur. Der außerdem aufgeführte vorläufige Typ V 120 ist für die Verwendung in Verstärkerstufen bis etwa 1 GHz geeignet.

Zu Schwingungen anregbar sind die Transistoren noch bis zu der in Tafel 1 ebenfalls angegebenen »maximalen Oszillationsfrequenz«, die wesentlich höher liegt und sich z.B. aus Gleichung (2) dadurch ergibt, daß die Leistungsverstärkung $V_{L \text{ opt}} = 1$ gesetzt wird. Einige charakteristische Werte der Hochfrequenz-Leistungsverstärkung bei höheren Frequenzen sind in Tafel 1 angeführt. Mit steigender Frequenz nimmt nach Gleichung (2) die Leistungsverstärkung mit 6 dB je Frequenzoktave ab. Da dieser theoretische Wert nicht in allen praktisch vorliegenden Fällen exakt gilt, orientiert sich der Anwender über den zweckmäßigen Einsatz bei hohen Frequenzen am besten anhand der sogenannten Y-Parameter der Vierpoldarstellung (Bild 8). Zur Veranschaulichung ist in Bild 9 für den Transistor AFY 11 ein Ausschnitt einer solchen Darstellung für Basisschaltung gegeben. Sie hat den Vorteil, daß man für verschiedene Arbeitspunkte und Frequenzen sowohl die Anpassungsbedingungen als

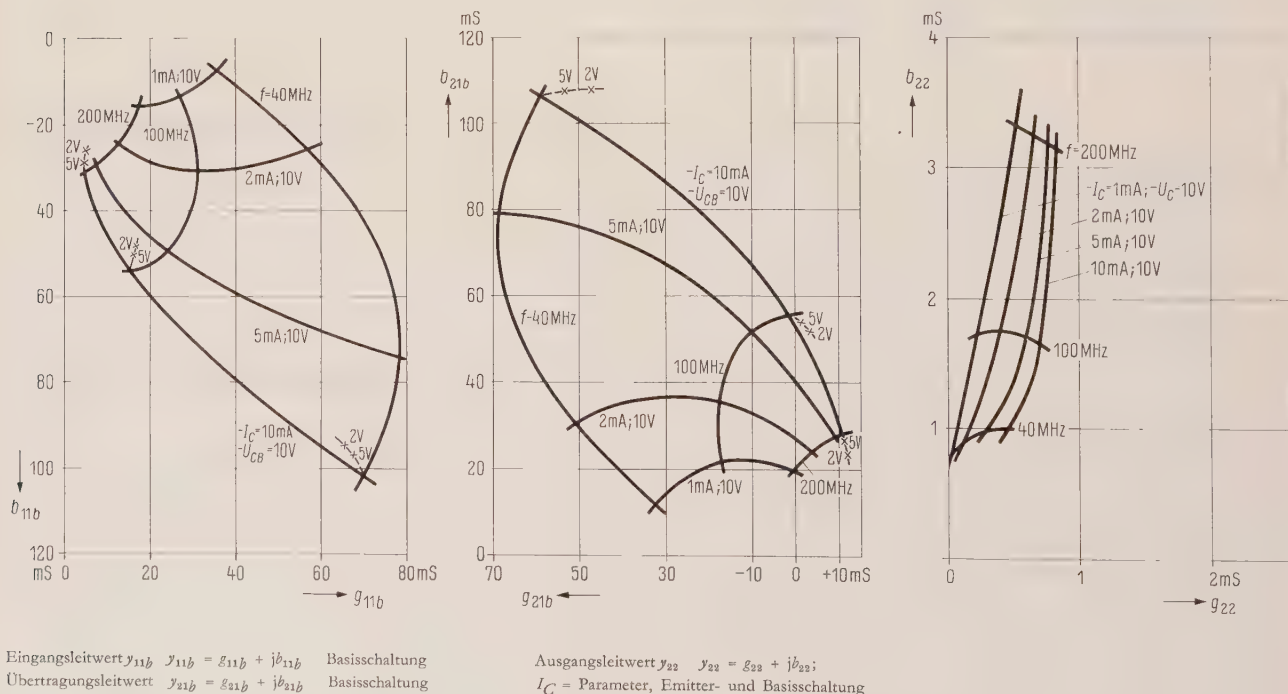


Bild 9 Verlauf der Y-Parameter y_{11} , y_{22} und y_{21} als Funktion von Frequenz und Arbeitspunkt für den Typ AFY 11 in Basisschaltung

auch z.B. nach

$$V_{L \text{ opt}} = \frac{|y_{21}|^2}{4g_{22}g_{11}} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} g_{11} & \text{Realteil von } y_{11} \\ g_{22} & \text{Realteil von } y_{22} \end{cases} \quad (4)$$

die optimale Leistungsverstärkung im angepaßten und neutralisierten Betrieb bestimmen kann. Naturgemäß kann die Leistungsverstärkung bei Zulassung einer gewissen Rückkopplung noch über $V_{L \text{ opt}}$ angehoben werden, da im neutralisierten Falle die Rückwirkung y_{12} bewußt durch Zuschalten eines passiven Vierpols zu Null gemacht wird.

Doch können diese Zusammenhänge hier nur kurz gestreift werden. Wegen Einzelheiten sei z.B. auf die Veröffentlichungen von S. SCHWARZ [14] und R. WIESNER [15] verwiesen.

Neben den Werten der Leistungsverstärkung sind für die Beurteilung eines Transistors die Eigenrauschwerte bei hohen Frequenzen wichtig. Die Daten in Tafel 1 zeigen die hervorragende Eignung dieser Transistoren für Vorstufen mit hoher Eingangsempfindlichkeit.

Ersatzschaltbild

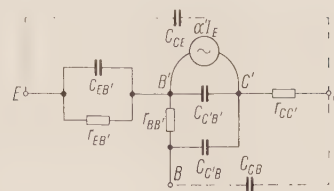
Für manche Zwecke ist neben der Kenntnis der Y-Parameter die Veranschaulichung des Transistorverhaltens anhand des Ersatzschaltbildes von Bedeutung. In Bild 10 sind die ungefähren Werte für AFY 11 bei einem Arbeitspunkt von $-I_c = 10 \text{ mA}$, $-U_{CE} = 10 \text{ V}$ bei 100 MHz angegeben. Die idealisierte Hochfrequenz-Ersatzschaltung (Bild 10) läßt das Transistorverhalten bis etwa 300 MHz gut berechnen.

Es enthält als einzige stark frequenzabhängige Größe den Stromgenerator αI_E . Nach D. E. THOMAS und J. L. MOLL [16] kann er etwa angesetzt werden als

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + jf/f_\alpha} e^{-j\pi(f/f_\alpha)}$$

mit
$$m = 1 - \frac{f_\alpha}{f_\beta} (1 - \alpha_0) \approx 0,5$$

Der Emitter wird dargestellt durch den Diffusionswiderstand $r_{EB'}$ und parallel zu ihm die Emitterkapazität $C_{EB'}$ (Diffusions- und Sperrschichtkapazität zusammengefaßt). Es folgen der Basiswiderstand $r_{BB'}$ und weiter, für die Mesabauform kennzeichnend, die Aufteilung der Kollektorkapazität in die noch konzentrierten Teilkapazitäten (1. Näherung) $C_{C'B}$ und $C_{C'B'}$, die an beiden Enden des Basiswiderstandes angreifen. In Basisschaltung wird nur $C_{C'B'}$, der sogenannte rückwirkungsaktive Anteil, in die Kenngröße $h_{12} = \omega (r_{BB'} C_{C'} + h_{11} C_{EC})$ sowie in den Realteil des Ausgangsleitwertes g_{22} wesentlich eingehen. Die Kapazität $C_{C'B}$ wirkt statt dessen nahezu analog der Durchführungskapazität C_{CB} (durch die Grundplatte) und



Die Elemente des Ersatzschaltbildes haben folgende Mittelwerte:

Frequenz	f	= 100 MHz
Arbeitspunkt	$-I_C$	= 10 mA
	$-U_{CE}$	= 10 V
Emitter-Diffusions-Widerstand	$r_{EB'}$	= 2,5 Ω
Emitter-Diffusions-Sperrschicht-Kapazität	$C_{EB'}$	= 140 pF
Stromgenerator	$ \alpha' $	= 0,98 α_0
	$\varphi \alpha'$	= -15
Basis-Ausbreitungswiderstand	$r_{BB'}$	= 45 Ω
Kollektor-Sperrschicht-Kapazität	$C_{C'B'}$	= 0,4 pF
Kollektor-Sperrschicht-Kapazität	$C_{C'B}$	= 0,8 pF
Kollektor-Bahnwiderstand	$r_{CC'}$	= 40 Ω
Gehäusekapazitäten	C_{CE}	= 0,6 pF
	C_{CB}	= 0,6 pF

Bild 10 Hochfrequenz-T-Ersatzschaltung des Mesatransistors mit Werten für den Typ AFY 11 beim Arbeitspunkt ($-U_{CE} = 10 \text{ V}$; $-I_C = 10 \text{ mA}$)

kann für viele Zwecke in den äußeren Schwingkreis mit einbezogen werden. Die übrigen Durchführungskapazitäten und Bahnwiderstände sind ebenfalls aufgeführt.

Hiervon hat der Kollektorwiderstand $r_{CC'}$, wie schon erwähnt, besondere Bedeutung; für epitaxiale Typen wird er vernachlässigbar. Bei hohen Arbeitsfrequenzen ist mit zusätzlichen Einflüssen der Induktivitäten in sämtlichen Zuleitungen zu rechnen.

Schrifttum

- [1] Zuleeg, R. und Vodicka, V. W.: Parametric Amplification Properties in Transistors. Proc. IRE **48** (1960) 1785 bis 1786
- [2] Vodicka, V. W. und Zuleeg, R.: Transistor Operation beyond Cutoff Frequency. Electronics **33**, **35** (1960) 56
- [3] Shockley, W., Sparks, M. und Teal, G. K.: pn-Junction Transistors. Phys. Rev. **83** (1951) 151 bis 162
- [4] Pritchard, R. L.: High-Frequency Power Gain of Junction Transistors. Proc. IRE **43** (1955) 1075 bis 1085
- [5] Stewart, J. M.: The Noise Figure of Junction Transistors. Proc. IEE **47** (1959)
- [6] Krömer, H.: Zur Theorie des Diffusions- und Drifttransistors AEU **8** (1954) 223 bis 228, 363 bis 364 und 499 bis 504
- [7] Pritchard, R. L.: Frequency Variations of Junction-Transistor Parameters. Proc. IRE **42** (1954) 786 bis 799
- [8] Lee, C. A.: A High Frequency Diffused Base Germanium Transistor. Bell System Techn. J. **35** (1956) 23 bis 34
- [9] Talley, H. E.: A Family of Diffused Base Germanium Transistors. IRE Wescon Conv. Rec. 1958 (B) 115 bis 121
- [10] Warner, R. M., Early, J. M. und Loman, G. T.: Structure and Performance of a Diffused-Base Germanium Oscillator Transistors. IRE Trans ED-5 (1958) 127 bis 130
- [11] Early, J. M.: Structure Determined Gain-Band Product of Junction Triode Transistors. Proc. IRE **46** (1958) 1924 bis 1927
- [12] Knowles, C. H.: New Transistors Design »The Mesa«. Electronic Industries **17** (1958) 55 bis 60
- [13] Müller, C. W. und Hilibrand, J.: The »Thyristor« - A new high-speed switching transistor. IRE Trans Vol. ED-5 (1958) 2 bis 5
- [14] Christensen, H.: Electrical Contacts with Thermocompression Bonds. Bell Labor. Rec. **36** (1958) 127 bis 130
- [15] Schwartz, G.: Selected Semiconductor Circuits Handbook. John Wiley & Sons New York 1960 Kap. 4-5
- [16] Wiesner, R.: Transistoren für hohe Frequenzen. Nachrichtentechnische Fachberichte NTF **18** (1960) 19 bis 29
- [17] Thomas, D. E. und Moll, J. L.: Junction Transistor Short-Circuit Current Gain and Phase Determination. Proc. IRE **46** (1958) 1177 bis 1185

* Die sogenannten h -Parameter sind analog den y -Parametern (Bild 9) durch die Gleichung

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \\ I_2 &= h_{21} I_1 + h_{22} U_2 \end{aligned}$$

definiert. h_{12} ist eine Größe, die die Spannungsrückwirkung kennzeichnet:

$$h_{12} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)_{I_1 = 0}$$

Theoretische und experimentelle Untersuchungen eines mechanischen Schwingungsdämpfers für elektrische Wellen

VON FLORENZ UNGRUH

In neuzeitlichen technischen Anlagen bevorzugt man statt eines großen Antriebsmotors die Aufteilung der gesamten Antriebsleistung auf viele Einzelmotoren. Außer wirtschaftlichen Vorteilen ergibt sich damit ein übersichtlicher Aufbau der Anlage, da auf mechanische Übertragungselemente – Zwischengetriebe, mechanische Verbindungswellen, Ketten- und Riementriebe – weitgehend verzichtet werden kann.

Im Zuge dieser Entwicklung ist den Gleichlaufantrieben besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Manche Anlagen erfordern aus technologischen Gründen an räumlich getrennten Stellen Antriebselemente mit untereinander genau übereinstimmender Drehzahl, etwa um ein Arbeitsgut mit konstanter Geschwindigkeit zu transportieren oder für das Zusammenwirken mehrerer Maschinenteile einer Werkzeugmaschine u. a. m. Mit mechanischen Wellen ist Gleichlauf leicht zu erreichen, da sie die Maschinengruppen praktisch starr miteinander verbinden. Parallel arbeitende Asynchronmotoren stimmen in ihrer Drehzahl jedoch nur annähernd überein und gewährleisten nicht ohne weiteres den Gleichlauf. Um trotzdem einen synchronen Lauf zu erreichen, verbindet man die Antriebsgruppen durch eine sogenannte elektrische Welle. Diese Gleichlaufeinrichtung hat sich in den verschiedensten Bereichen der Technik gut bewährt [1 bis 9]. Bild 1 zeigt, wie die beiden Wellenmaschinen $WM1$ und $WM2$ mit den Lastgruppen L_1 und L_2 gekuppelt sind und durch die ständer- und läuferseitige Zusammenschaltung der Wicklungen im Gleichlauf gehalten werden. In dem gewählten Beispiel ist nur ein Antriebsmotor (A_1) vorge-

sehen; die Last L_2 wird über die elektrische Welle angetrieben.

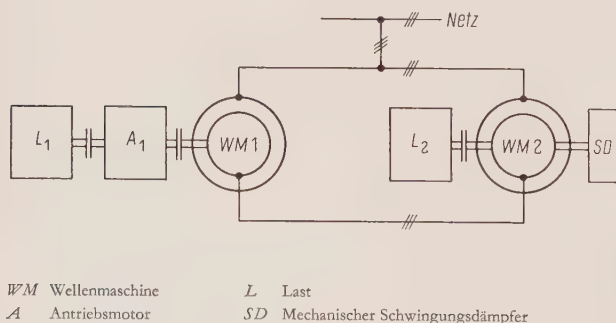
Über die Betriebseigenschaften der elektrischen Welle wurden zahlreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen angestellt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den stationären und den dynamischen Eigenschaften. Man nennt einen Betriebszustand stationär, wenn die Antriebs- und Lastmomente im Gleichgewicht stehen und daher keine Beschleunigung der Schwungmassen auftritt. Eine Untersuchung des dynamischen Verhaltens befaßt sich mit den Vorgängen bei plötzlichen Laständerungen oder bei Pendelungen um eine Gleichgewichtslage. Im folgenden werden die stationären Eigenschaften der elektrischen Welle als bekannt vorausgesetzt und nur die dynamischen Vorgänge erörtert.

Pendelungen elektrischer Wellen

Eine elektrische Welle ist schwingungstechnisch als System aus elastisch gekoppelten Schwungmassen aufzufassen und ist als solches ein schwingungsfähiges Gebilde [10]. Periodische Ausgleichsvorgänge treten als Übergangserscheinung bei plötzlichen Laständerungen oder Laststößen immer auf und verdienen keine besondere Beachtung, wenn sie schnell wieder verschwinden. Sie können jedoch sehr gefährlich werden und zu ernstlichen Betriebsstörungen Anlaß geben, wenn sie nur schwach abgedämpft oder sogar noch angefacht werden. Die Größe der Dämpfung bei elektrischen Wellen ist daher entscheidend bei der Beurteilung der dynamischen Stabilität.

Die insgesamt wirksame Dämpfung setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, die von den angekuppelten Arbeitsmaschinen, von den Antriebsmotoren und von den Wellenmaschinen herrühren können. Die Schwingungsdämpfung der Arbeitsmaschinen und auch der Antriebsmotoren ist meistens stark positiv, wogegen die Dämpfung der Wellenmaschinen unter bestimmten Bedingungen sehr klein und sogar negativ werden kann, was einer Anfachung von Schwingungen gleichkommt. Die Bedingungen für das Auftreten negativer Dämpfung wurden theoretisch untersucht [11, 12]; sie werden hier als bekannt vorausgesetzt.

Zur Unterdrückung selbsterregter Pendelungen sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich, wenn die



WM Wellenmaschine
 A Antriebsmotor

L Last
 SD Mechanischer Schwingungsdämpfer

Bild 1 Elektrische Ferndreherwelle mit Schwingungsdämpfer, der am Empfänger angebaut ist

positive Dämpfung der Arbeits- und Antriebsmaschinen stärker ist als die Anfachung der Wellenmaschinen, wenn also die resultierende Dämpfung positiv bleibt. Dies ist häufig der Fall. Es kommt aber auch vor, daß alle übrigen Anteile verschwinden und nur die Dämpfung der elektrischen Welle wirksam bleibt. Dies ist z. B. bei elektrischen Ferndreherwellen in der Anordnung entsprechend Bild 1 der Fall, wenn die Last L_2 abgekuppelt wird und die Wellenmaschine $WM2$ leer mitläuft. In diesem Betriebszustand können sich daher besonders leicht selbst-erregte Schwingungen ausbilden, deren Amplitude wächst und die sich gelegentlich bis zum Außertritt-fallen des Gleichlaufsystems aufschaukeln. Um solche Schwierigkeiten zu vermeiden, muß dafür gesorgt werden, daß auch in diesem Fall die resultierende Dämpfung positiv bleibt.

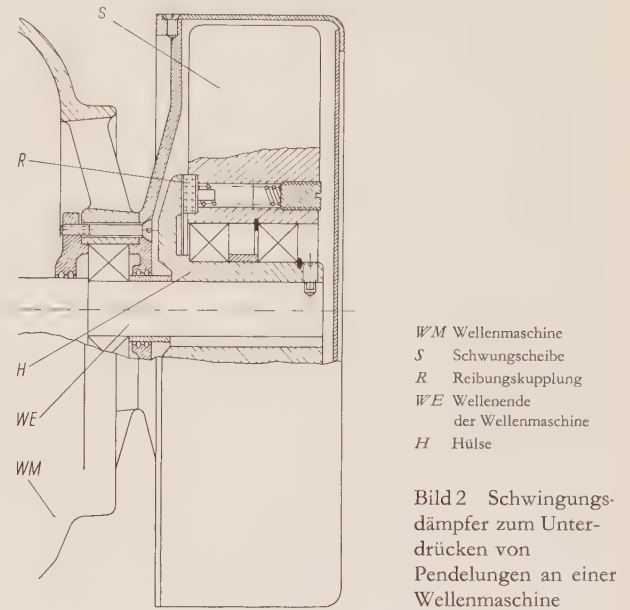
Im Schrifttum [10 bis 16] sind die verschiedensten Möglichkeiten untersucht und diskutiert worden, die auf elektrischem Wege eine Verbesserung der Dämpfung an den Wellenmaschinen bewirken können. Es handelt sich dabei im wesentlichen um die Einschaltung von ohmschen oder komplexen Widerständen in die Verbindungsleitungen zwischen den Ständer- oder Läuferwicklungen oder um Gleichstromspeisung der Wellenmaschinen. Als weitere Möglichkeit wurde die Reihenschaltung der Ständerwicklungen vorgeschlagen [17]. Diese Maßnahmen haben jedoch den großen Nachteil, daß sie nicht nur die Dämpfung verändern, sondern auch das stationäre Verhalten der elektrischen Welle stark beeinflussen und meistens die übertragbaren Drehmomente erheblich vermindern. Man muß sich daher schon beim Projektieren über die notwendigen Dämpfungsmaßnahmen klar werden – was oft sehr schwer ist, da die äußeren Dämpfungen unbekannt sind –, oder die Wellenmaschinen müssen stark überdimensioniert werden, damit auch später bei möglicherweise notwendiger elektrischer Dämpfung die geforderten Lastmomente übertragen werden können. Erwünscht ist daher eine Dämpfungseinrichtung, die die stationären Eigenschaften nicht beeinflußt und die nur bei Bedarf – falls nämlich an der fertigen Anlage Pendelungen auftreten – eingesetzt werden kann. Hierfür wird ein mechanischer Schwingungsdämpfer vorgeschlagen, der auf einem normalen zweiten freien Wellenende der Gleichlaufmaschinen montiert werden kann.

Aufbau und Wirkungsweise des Schwingungsdämpfers

Der Schwingungsdämpfer (Bild 2) besteht im wesentlichen aus einer Schwungscheibe S , die auf einer mit dem freien Wellenende WE der Gleichlaufmaschine WM starr verbundenen Hülse H drehbar gelagert ist. Die Schwungscheibe S und die Hülse H stehen außerdem über eine Reibungskupplung R mit einstellbarem Reibungsmoment M_R miteinander in Verbindung. Dadurch können der Läufer der Wellenmaschine und die Schwungscheibe S mit einem beliebig zwischen Null und einem

maximalen Wert einstellbaren Reibungsmoment aneinander gekuppelt werden.

Die Wirkungsweise des Schwingungsdämpfers beruht auf folgenden Gedanken: Eine negative Dämpfung bedeutet, daß in jeder Periode einer Pendelung dem schwingenden System Energie zugeführt wird. Man muß also dafür sorgen, daß dem System mindestens die ständig zugeführte Energie, möglichst aber noch mehr, im Verlauf der Schwingung wieder entzogen wird. Dies ge-



schieht im Schwingungsdämpfer. Die Schwungmasse des Dämpfers rotiert im stationären Betrieb mit gleicher Geschwindigkeit wie der Läufer. Bei auftretenden Pendelungen führt der Läufer Schwingungen mit einer Frequenz von einigen Hertz aus, denen die Schwungmasse des Dämpfers wegen ihrer großen Trägheit nicht zu folgen vermag. Sie rotiert daher auch bei Pendelungen mit praktisch konstanter Winkelgeschwindigkeit, während sich der Läufer gegenüber der Dämpfer-Schwungscheibe vor- und zurückdreht. Dabei wird, entsprechend dem eingestellten Reibungsmoment, in der Kupplung Energie in Wärme umgesetzt, die dem schwingenden System entzogen wird. Diese Energie im Verhältnis zum Energieinhalt des Schwingungssystems ist ein Maß für die Dämpfung.

Die Größe der von einem Schwingungsdämpfer erreichbaren Dämpfung ist proportional dem eingestellten Reibungsmoment der Kupplung. Das optimale Reibungsmoment hängt vom Verhältnis der Schwungmassen der Dämpferschwungscheibe zu der des Läufers ab. Es ist zu bedenken, daß bei zu großem Kupplungsmoment die Schwungscheibe schließlich doch den Pendelungsbewe-

gungen folgt und wie ein starr gekoppeltes Schwungmoment wirkt, d. h. lediglich eine Verlagerung der Eigenfrequenz, aber keine Verbesserung der Dämpfung bewirkt. Gesichtspunkte für die Bemessung des Dämpferschwungmomentes und des günstigen Reibungsmomentes müssen von der Größe der Schwingungsanfachung abgeleitet werden.

Berechnung der Dämpfungsarbeiten

Aufgrund der hier angestellten Überlegungen wurden die Pendelungen der leer laufenden elektrischen Welle als die gefährlichsten erkannt. Für diesen Betriebsfall ergibt sich nach [12] bei dreiphasigem Netzanschluß entsprechend Bild 1 der an jeder Wellenmaschine wirksame Dämpfungsfaktor d zu:

$$d = \text{const} \frac{p}{\omega} \beta \frac{[\beta(1 + \alpha^2) + s\alpha(1 - \sigma)]^2 - s^2(\alpha^2 + \sigma)^2}{(1 + \alpha^2)[(\alpha\beta - s\sigma)^2 + (\beta + s\alpha)^2]} \quad (1)$$

mit

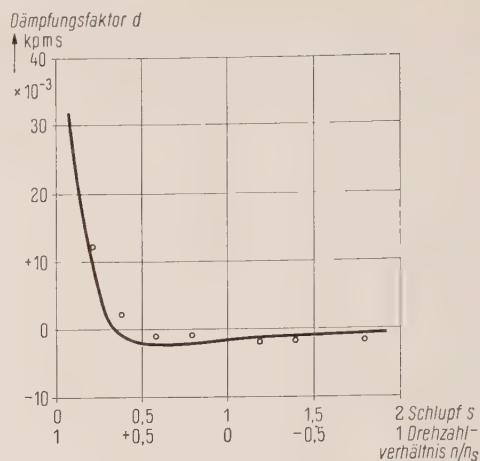
$$\text{const} = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega} U I_\mu (1 - \sigma) \quad (2)$$

Die Gleichungen gelten für Wellenmaschinen gleicher Bauart. Die Bezeichnungen haben folgende Bedeutung:

U	Strangspannung des Ständers
I_μ	Magnetisierungsstrom
ω	Kreisfrequenz des Netzes
p	Polpaarzahl der Wellenmaschinen
$\alpha = \frac{R_1}{\omega L_1}$	Bezogener Ständerwiderstand der Wellenmaschinen
$\beta = \frac{R_2}{\omega L_2}$	Bezogener Läuferwiderstand der Wellenmaschinen
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{I_{\sigma 1} L_2}$	Totaler Streukoeffizient der Wellenmaschinen
s	Betriebsschlupf der elektrischen Welle

Der Dämpfungsfaktor d ist also eine Funktion der Maschinendaten I_μ , α , β und σ und des Schlupfes s . Bild 3 enthält als durchgezogene Linie den Verlauf des Dämpfungsfaktors über dem Schlupf für eine elektrische Welle aus Maschinen mit einer Motornennleistung von 5 kW und den Daten $\alpha = 0,018$, $\beta = 0,022$, $I_\mu = 1,35$ A und $\sigma = 0,07$ bei einer Netzspannung von 190 V (halbe Nennspannung). Außerhalb eines begrenzten Schlupfbereiches in der Nähe des Synchronpunktes ist die elektromagnetische Dämpfung der Wellenmaschinen negativ.

Für die Bemessung eines Schwingungsdämpfers interessiert der Mindestwert der vorkommenden Dämpfung. Wegen der damit verbundenen erheblichen Vereinfachungen soll die Rechnung unter Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes der Ständerwicklung durchgeführt werden. Diese Näherung ist bei größeren Maschinen stets zulässig und bewirkt auch bei Maschinen mit Nennleistungen von einigen Kilowatt nur einen geringen Feh-



— Errechneter Dämpfungsfaktor der elektrischen Welle
○ Meßpunkt bei Dämpfermoment $M_R = 0$

Bild 3 Dämpfungsfaktor d der elektrischen Welle abhängig vom Schlupf s

ler; im übrigen befindet man sich mit dieser Rechnung auf der sicheren Seite, da der Mindestwert der Dämpfung durch den ohmschen Ständerwiderstand etwas angehoben wird.

Bei $\alpha = 0$ vereinfacht sich Gleichung (1) zu

$$d = \text{const} \frac{p}{\omega} \beta \frac{\beta^2 - s^2 \sigma^2}{\beta^2 + s^2 \sigma^2} \quad (3)$$

Setzt man die partielle Ableitung nach dem Schlupf $\delta d / \delta s = 0$, so erhält man den Schlupf \bar{s} , bei dem das Minimum des Dämpfungsfaktors auftritt zu

$$\bar{s} = \sqrt[3]{\frac{\beta}{\sigma}} = \sqrt[3]{s_K} \quad (4)$$

mit s_K als Kippschlupf der Wellenmaschinen im Betrieb als Asynchronmotor. Der Betrag des Dämpfungsfaktors d im Minimum ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung (4) in Gleichung (3):

$$\bar{d} = -\frac{p}{\omega} \text{const} \frac{1}{8\beta} \quad (5)$$

Man kann sich oft die Berechnung der Konstanten ersparen, wenn man d auf das Kippmoment M_K der Wellenmotoren bezieht, das den Wert hat

$$M_K = \text{const} \frac{1}{\sqrt{(1 + \alpha^2)(\sigma^2 + \alpha^2) + \alpha(1 - \sigma)}} \quad (6)$$

Bei $\alpha = 0$ vereinfacht sich die Gleichung (6) zu

$$M_K = \text{const} \frac{1}{\sigma} \quad (7)$$

Damit erhält man den Minimalwert des Dämpfungsfaktors:

$$\bar{d} = -\frac{p}{\omega} \frac{1}{8s_K} M_K \quad (8)$$

Diese Gleichung ermöglicht es, nur aus dem Kippmoment M_K und dem Kippschlupf s_K der verwendeten Wellenmaschinen schnell und einfach den geringsten Wert des Dämpfungsfaktors zu errechnen, der für die Beurteilung der dynamischen Stabilität zugrunde zu legen ist.

Im dynamischen Betrieb folgen die Pendelbewegungen der Gleichung

$$\Theta \ddot{\Psi} + k \dot{\Psi} + D = 0 \quad (9)$$

Hierin bedeuten Θ die wirksame Schwungmasse und $k = -\delta M / \delta \varphi$ die Steilheit der Drehmomentlinie der Wellenmaschinen im jeweiligen Arbeitspunkt. Der Winkel Ψ bedeutet die Winkelabweichung der betrachteten Wellenmaschine von der Gleichgewichtslage, gemessen in mechanischen Winkelgraden. Unter der Bezeichnung D sollen alle wirksamen Dämpfungsmomente zusammengefaßt sein.

Bevor die verschiedenartigen Dämpfungen miteinander in Beziehung gebracht werden, muß zunächst auf einen wesentlichen physikalisch bedingten Unterschied aufmerksam gemacht werden. Die elektromagnetische Dämpfung entsteht dadurch, daß im Verlauf der Pendelung Abweichungen von der stationären Winkelgeschwindigkeit des Läufers auftreten. Die Größe des Dämpfungsmomentes ist im Bereich kleiner Pendelamplituden in erster Näherung proportional der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\Psi}$ der Pendelbewegung:

$$D_{el} = d \dot{\Psi} \quad (10)$$

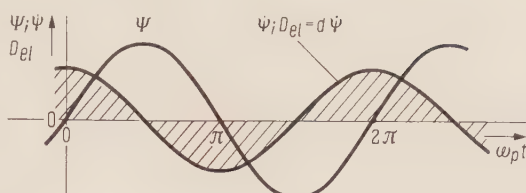
Das Dämpfungsmoment D_{el} hat also bei sinusförmigem Verlauf der Pendelbewegung ebenfalls Sinusform (Bild 4a).

Anders sind die Verhältnisse bei der Reibungsdämpfung. Das Reibungsmoment ist bei trockener Reibung nahezu unabhängig von der Relativgeschwindigkeit zwischen den aneinander gleitenden Körpern. Sobald eine Relativbewegung auftritt, ist die Reibung in voller Höhe wirksam, und das Dämpfungsmoment hat die Größe

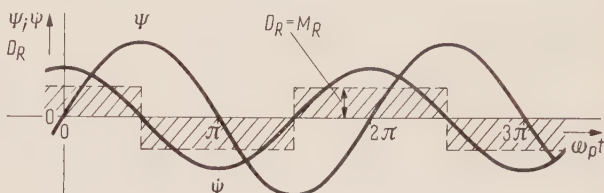
$$D_R = M_R \quad (11)$$

Seine Wirkung ist jedoch stets dem Sinne der Pendelbewegung entgegengerichtet, also positiv. (Dämpfungsfaktoren und Dämpfungsmomente gelten als positiv, wenn durch sie die Pendelbewegung gehemmt wird.)

Bild 4b zeigt den Verlauf des Dämpfungsmomentes D_R durch Reibung im Schwingungsdämpfer. Wegen der Verschiedenartigkeit des Verlaufs der Dämpfungsmomente – sinusförmig bei elektromagnetischer Dämpfung, zeitlich konstant bei Reibungsdämpfung – ist es nicht möglich, nur entsprechende Dämpfungsfaktoren miteinander zu vergleichen. Statt dessen muß man die Arbeitsmengen vergleichen, die in jeder Periode in das Schwingungssystem eingespeist oder ihm entzogen werden. Die Dämpfungsarbeit als Produkt aus Drehmoment und Winkelweg ist den in Bild 4 schraffierten Flächen



a Elektromagnetisches Dämpfungsmoment



b Dämpfungsmoment durch trockene Reibung

Bild 4 Dämpfungsmomente D bei sinusförmigem Schwingungsverlauf

proportional. Die elektrische Dämpfungsarbeit A_{el} je Periode ist

$$|A_{el}| = \frac{1}{2\pi} \int_0^\tau |D_{el}| dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\tau |d \dot{\Psi}| dt \quad (12)$$

wobei τ die Periodendauer der Schwingung ist. Die Dämpfungsarbeit hat das gleiche Vorzeichen wie der Dämpfungsfaktor d . Bei sinusförmigem Schwingungsverlauf

$$\Psi = \hat{\Psi} \sin \omega_p t \quad (13)$$

(mit $\omega_p = 2\pi f_p$ als Kreisfrequenz der Pendelbewegung) ergeben sich die Gleichungen

$$\dot{\Psi} = \omega_p \hat{\Psi} \cos \omega_p t \quad (14)$$

$$\ddot{\Psi} = -\omega_p^2 \hat{\Psi} \sin \omega_p t \quad (15)$$

Die Auswertung des Integrals nach Gleichung (12) ergibt

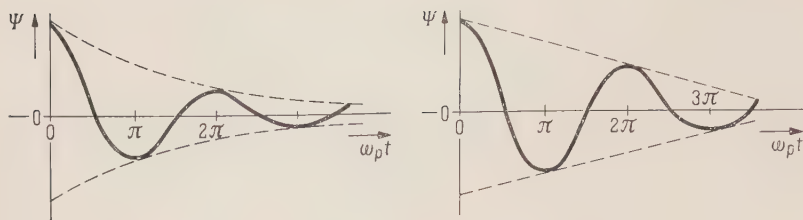
$$A_{el} = \frac{2}{\pi} d \omega_p \hat{\Psi} \quad (16)$$

Die Reibungsarbeit ist immer positiv und ergibt sich in analoger Weise zu

$$A_R = M_R \quad (17)$$

Damit läßt sich die Größe des Reibungsmomentes M_R angeben, das erforderlich ist, damit auch im ungünstigsten Fall bei $d = d$ keine selbsterregten Schwingungen auftreten. Die Bedingung hierfür ist, daß bei $d = d$ die Dämpfungsarbeit $A_R \geq -A_{el}$ ist, also

$$M_R \geq \frac{2}{\pi} d \omega_p \hat{\Psi} \quad (18)$$



Verlauf bei elektromagnetischem Dämpfungsmoment

Verlauf bei trockener Reibung

Bild 5 Verlauf einer freien gedämpften Schwingung

Für die praktische Auswertung dieser Gleichung ist es in gewisser Weise unangenehm, daß darin außer den durch die Auslegung gegebenen Größen d und ω_p auch die Ausschlagsamplitude $\dot{\Psi}$ der Pendelung erscheint. Das muß aber aus physikalischen Gründen so sein, da bei vorgegebener Pendelfrequenz die Reibungsarbeit unabhängig vom Pendelausschlag ist (vgl. Bild 4b und Gleichung 17), wogegen die Winkelgeschwindigkeiten bei größerer Schwingungsamplitude zunehmen und damit die elektrische Dämpfungsarbeit je Periode wächst. Die Folge davon ist, daß die Einhüllende bei geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung einer Exponentialfunktion folgt, wogegen bei Reibungsdämpfung die Schwingungsamplituden nach einer geraden Linie abnehmen (Bild 5). Im letztgenannten Fall werden daher Schwingungen mit großer Amplitude verhältnismäßig schwächer gedämpft als kleine Ausschläge. Das kommt in Gleichung (18) durch die Proportionalität des erforderlichen Reibungsmomentes M_R zur Schwingungsamplitude $\dot{\Psi}$ zum Ausdruck: Je größer die Schwingungsaus-schläge $\dot{\Psi}$ sind, um so größer muß das Reibungsmoment M_R sein, damit die bei negativer Dämpfung elektrisch zugeführte Energie im Schwingungsdämpfer voll in Reibungswärme umgewandelt werden kann.

Bei den bisherigen Überlegungen wurde eine Nebenerscheinung zunächst völlig außer acht gelassen, die zwar auf die Dämpfung nur geringen Einfluß ausübt, für die Bemessung des Schwungmomentes des Schwingungsdämpfers aber von entscheidender Bedeutung ist: Die beschriebenen Verhältnisse sind nur dann wirklich gegeben, wenn der Schwingungsdämpfer eine unendlich große Schwungmasse hat. Bei endlicher Schwungmasse setzt der Reibungsvorgang in der Kupplung erst dann ein, wenn das Moment der trägen Masse das Reibungsmoment überwiegt. Im Bereich des Nulldurchganges von $\dot{\Psi}$ wird also stets eine kleine Zone ohne Relativbewegung zwischen Läufer und Schwungscheibe sein, die begrenzt ist durch

$$\dot{\Psi}_R = \frac{M_R}{\Theta_D} \quad (19)$$

Hierin bedeutet Θ_D das Trägheitsmoment des

Schwingungsdämpfers. Nach den Gleichungen (13) und (15) ist

$$\dot{\Psi} = \omega_p^2 \Psi \quad (20)$$

Man erhält den Winkelbereich Ψ_R , über den der Rutschvorgang aussetzt, zu

$$\Psi_R = \pm \frac{M_R}{\omega_p^2 \Theta_D} \quad (21)$$

oder, als Dimensionierungsgleichung für die Schwungscheibe des Schwin-

gungsdämpfers:

$$\Theta_D = \frac{M_R}{\omega_p^2 \Psi_R} \quad (22)$$

Schwingungen, deren Amplitude kleiner als Ψ_R ist, können vom Schwingungsdämpfer nicht mehr unterdrückt werden. Gehen jedoch die Ausschläge über Ψ_R hinaus, so tritt die dämpfende Wirkung schon bei verhältnismäßig kleinen Schwingungen fast voll in Erscheinung. Die Dämpfungsarbeit A_R' ergibt sich unter Berücksichtigung der toten Zone aus der nach Gleichung (17) für $\Theta_D = \infty$ berechneten Arbeit A_R zu

$$A_R' = A_R \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\Psi_R}{\dot{\Psi}} \right) \quad (23)$$

Wählt man z. B. die Schwungmasse des Dämpfers so, daß $\Psi_R = 1^\circ$ wird, so sinkt bei einer Pendelung mit einer Amplitude von $\dot{\Psi} = 3^\circ$ die Reibungsarbeit auf nur etwa 80% des Wertes bei $\Theta_D = \infty$.

Auslegung des Schwingungsdämpfers

Die Bemessung des Schwingungsdämpfers wird durch das Reibungsmoment M_R der Kupplung und die Schwungmasse Θ_D der Schwungscheibe bestimmt. Beide Größen können aus den Daten der Wellenmaschinen und, bei Vorgabe der gewünschten Winkelgenauigkeit, aufgrund der vorstehenden Berechnungen ohne weiteres angegeben werden. Nach Festlegung der Größe der Wellenmaschinen errechnet man das Minimum des Dämpfungsfaktors d nach Gleichung (8) und die Eigenkreisfrequenz ω_p des Gleichlaufsystems:

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{c}{\Theta_{\text{res}}}} \quad (24)$$

mit

$$\Theta_{\text{res}} = \frac{\Theta_1 \Theta_2}{\Theta_1 + \Theta_2} \quad (25)$$

Hierin bedeutet c die Federsteife der elektrischen Welle und entspricht der Steilheit der Drehmomentkennlinie im Nulldurchgang. Θ_1 und Θ_2 sind die Summen aller Schwungmassen, die in der Maschinengruppe 1 bzw. 2 des Gleichlaufsystems zusammengekuppelt sind, wobei jedoch die Schwungscheibe des Schwingungsdämpfers

nicht berücksichtigt werden darf. Die im äußersten Fall vorkommende Schwingungsamplitude $\dot{\Psi}$ muß nach den jeweils vorliegenden Betriebsverhältnissen angenommen werden. Es erscheint zweckmäßig, etwa den größten vorkommenden Lastwinkel hier anzusetzen, wenn eine plötzliche völlige Entlastung möglich erscheint. Der Winkel $\dot{\Psi}$ kann bei vierpoligen Maschinen etwa 20° mechanisch betragen, was einem Lastwinkel von 40° elektrisch entspricht. Damit kann aus Gleichung (18) das mindestens erforderliche Reibungsmoment M_R berechnet werden.

Die erforderliche Schwungmasse Θ_D des Dämpfers läßt sich nach Gleichung (22) bestimmen. Die ungedämpfte Zone im Bereich $\pm \Psi_R$ kann beliebig gewählt werden. Wird eine hohe Winkelgenauigkeit verlangt, wie z. B. oft bei Antrieben von Werkzeugmaschinen, so kann $\Psi_R = 1^\circ$ oder $0,5^\circ$ zweckmäßig sein. Man muß dabei auch auf die Anbaumöglichkeiten für die erforderliche Schwungmasse Rücksicht nehmen.

Eine elektrische Welle besteht normalerweise aus zwei Wellenmaschinen. Der Schwingungsdämpfer sollte möglichst an der Maschinengruppe mit der kleineren Schwungmasse angebracht werden. An dieser Maschinengruppe sind bei Pendelungen die größeren Ausschlagamplituden zu erwarten, so daß der Schwingungsdämpfer hier wirksamer ist als an der anderen Gruppe. Besteht die elektrische Gleichlaufeinrichtung aus mehr als zwei Wellenmaschinen von u. U. unterschiedlicher Größe, so können auch mehrere Schwingungsdämpfer gleichzeitig eingesetzt werden, die jedoch vorzugsweise an den kleineren, mit geringeren Schwungmassen behafteten Antrieben angebaut werden sollten.

Die Wirkungsweise des Schwingungsdämpfers ist völlig unabhängig von der Drehzahl und der Drehrichtung, da sich die Pendelbewegung der Drehzahl linear überlagert. Die Wirksamkeit des Dämpfers ist bei Wellenmaschinen mit höherer Polzahl weniger gut, da $\dot{\Psi}$ mechanischen Winkelgraden \dot{p} elektrische Grade entsprechen und damit bei Pendelungen der mechanische Winkelausschlag kleiner wird.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden bei ungesättigter Maschine durchgeführt, um die Rechnungsergebnisse durch die Messungen exakter untermauern zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse gelten jedoch ohne Einschränkung auch für normal gesättigte Maschinen, wenn dabei die bei voller Nennspannung gültigen

Werte für die Maschinendaten I_m , α , β und σ eingesetzt werden. Bezüglich des Sättigungseinflusses sind also keine weiteren als die bei der Berechnung elektrischer Maschinen üblichen Annahmen erforderlich.

Experimentelle Untersuchungen

Zur Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse wurden an einer elektrischen Welle mit den schon erwähnten 5-kW-Maschinen Versuche durchgeführt. Den Aufbau der Versuchsanordnung zeigt Bild 6. Die Wellenma-

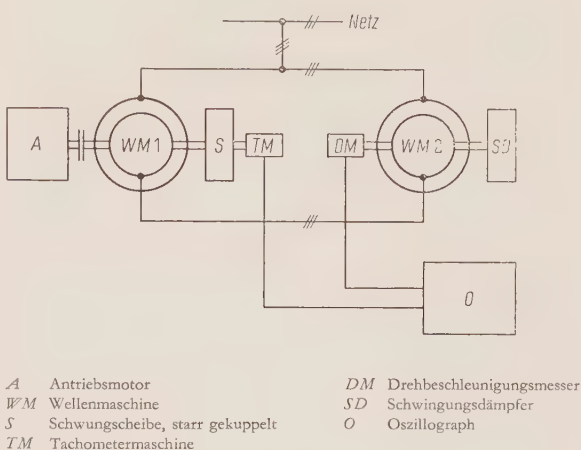


Bild 6 Versuchsanordnung zum Messen der Dämpfung

schine WM1 wird von einem Motor A angetrieben und ist andererseits mit einer Schwungmasse starr gekuppelt. Dadurch ist die Rückwirkung bei Pendelungen der Wellenmaschine WM2 auf den Maschinensatz 1 gering, so daß die äußeren Dämpfungen vom Antriebsmotor her

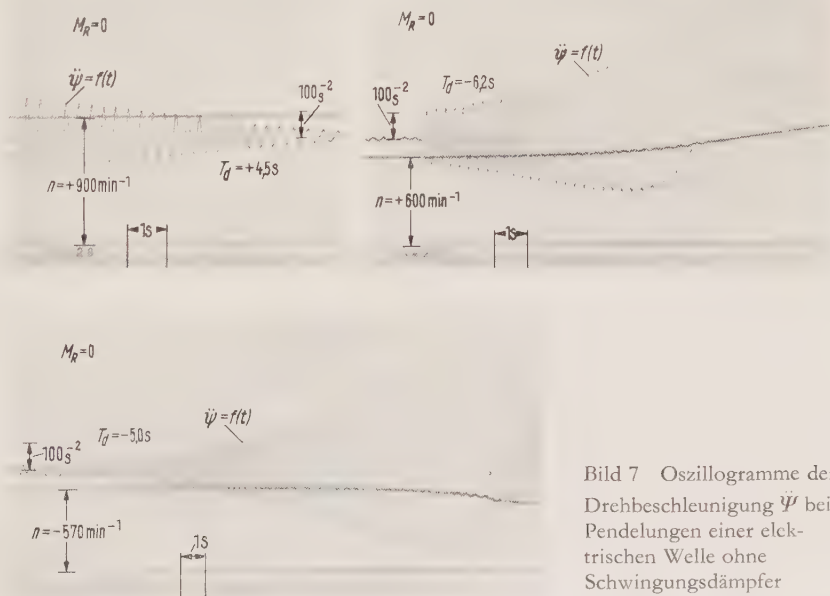


Bild 7 Oszillogramme der Drehbeschleunigung $\dot{\Psi}$ bei Pendelungen einer elektrischen Welle ohne Schwingungsdämpfer

auf die elektrische Welle gering bleiben. Die Wellenmaschine 2 läuft unbelastet. Sie ist mit einem Schwingungsdämpfer gekuppelt, der dem in Bild 2 gezeigten ähnlich ist. Die Pendelungen werden von einem Drehbeschleunigungsmesser aufgenommen und im Oszillographen geschrieben. Die an der Maschinengruppe 1 angeflanschte Tachometermaschine liefert eine drehzahlproportionale Spannung, die ebenfalls dem Oszillographen zugeführt wird.

Die Messungen wurden bei halber Nennspannung der Wellenmaschinen durchgeführt, um zu hohe Motorerwärmungen und den Einfluß der Sättigung zu vermeiden. Zunächst wurde der vorausberechnete Verlauf des Dämpfungsfaktors d noch einmal überprüft, indem das Reibungsmoment $M_R = 0$ eingestellt und der Dämpfer damit unwirksam gemacht wurde. Diese Meßpunkte sind in Bild 3 als Kreise eingezeichnet. Sie bestätigen den errechneten Kurvenverlauf. Bild 7 zeigt einige charakteristische Oszillogramme dieser Meßreihe. Bei $s = 0,4$ und $n = +900$ U/min verläuft die Schwingung gedämpft, wogegen aus den Oszillogrammen bei $s = 0,6$ ($n = +600$ U/min) und $s = 1,38$ ($n = -570$ U/min) das stetige Ansteigen der Schwingungsausläge zu erkennen ist. Nach einigen Sekunden wird das Kippmoment überschritten und die elektrische Welle fällt außer Tritt.

Zur Auswertung der Oszillogramme wurde die Zeitkonstante der Einhüllenden bestimmt, die für Ψ , $\dot{\Psi}$ und $\ddot{\Psi}$ stets den gleichen Wert hat. Der Dämpfungsfaktor d ergibt sich aus der Zeitkonstante T_d zu [12]

$$d = \frac{2 \Theta_{\text{res}}}{T_d} \quad (26)$$

Die Trägheitsmomente der beiden Maschinengruppen waren $\Theta_1 = 0,14 \text{ kpms}^2$ und $\Theta_2 = 0,0043 \text{ kpms}^2$. Die Schwungscheibe des Dämpfers hat ein Schwungmoment $\Theta_D = 0,033 \text{ kpms}^2$.

Bild 8 zeigt einige Oszillogramme bei $s = 0,8$ mit verschiedenen Werten des Kupplungsmomentes. Die negative Dämpfung bei $M_R = 0$ wird schon bei kleinen Reibungsmomenten durch den Dämpfer kompensiert, so daß auch Schwingungen mit großer Anfangsamplitude in wenigen Sekunden oder sogar in Bruchteilen davon verschwinden.

Mit den eingangs angegebenen Motordaten errechnet man für 110 V nach Gleichung (6) das Kippmoment $M_K = 1,5 \text{ kp m}$ und den zugehörigen Kippschlupf

$s_K = 0,31$. Damit ist mit $p = 2$ nach Gleichung (8) $d = -4,0 \cdot 10^{-3} \text{ kpms}$ bei $s = \sqrt{3} s_K = 0,54$. Dieser Punkt liegt – wie erwartet – etwas tiefer als das Minimum der Kurve des Dämpfungsfaktors in Bild 3.

Die Federsteife c bei Pendelungen um die Nullage erhält man [12] aus der Gleichung

$$c = \text{const } p s \frac{s(\alpha^2 + \sigma)}{(1 + \alpha^2)[(\alpha\beta - s\sigma)^2 + (\beta + s\alpha)^2]} \quad (27)$$

bei Schlupf $s = 0,8$ zu $c = 2,74 \text{ kp m/rad}$. Nach Gleichung (24) ergibt sich die Eigenkreisfrequenz $\omega_p = 25,7 \text{ s}^{-1}$ und die entsprechende Frequenz $f_p = 4,1 \text{ Hz}$ (aus dem Oszillogramm ergibt sich $f_p \approx 4,3 \text{ Hz}$). Mit dem für $U = 110 \text{ V}$ errechneten Wert für d ist nach Gleichung (18) für Schwingungen bis zu $\Psi = 20^\circ \triangleq 0,35 \text{ rad}$ zur Vermeidung selbsterregter Pendelungen ein Reibungsmoment $M_R = 2 \text{ kp cm}$ ausreichend, also ein verhältnismäßig geringer Wert. Bei voller Nennspannung wird $d \approx -20 \cdot 10^{-3} \text{ kpms}$, und das erforderliche Reibungsmoment beträgt $M_R \geq 10 \text{ kp cm}$. Läßt man in diesem Fall für den ungedämpften Bereich z. B. $\Psi_R = 1^\circ = 0,0175 \text{ rad}$ zu, so ist nach Gleichung (22) für den Dämpfer ein Trägheitsmoment $\Theta_D \geq 0,0076 \text{ kpms}$ vorzusehen – das ist das 2,3fache des Läufer-Eigenträgheitsmomentes der Wellenmaschinen. Der Schwingungsdämpfer bekommt damit eine Baugröße, die sich ohne Schwierigkeiten als Anbau an der Wellenmaschine unterbringen läßt.

Um einen einfachen Vergleich zwischen Rechnung und Messung durchführen zu können, wurden einige der in den Bildern 8 und 9 wiedergegebenen Oszillogramme in

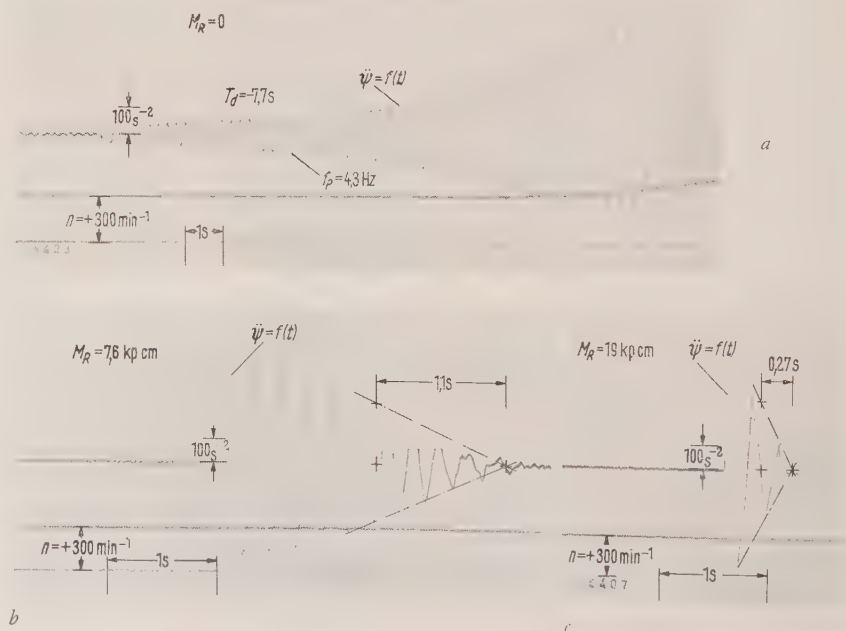


Bild 8 Oszillogramme der Drehbeschleunigung $\ddot{\Psi}$ bei Pendelungen einer elektrischen Welle für verschiedene Reibungsmomente M_R des Schwingungsdämpfers

der Art ausgewertet, daß bei einer bestimmten Schwingungsamplitude die Dämpfungszeitkonstante T_d gemessen wurde, aus der sich ein äquivalenter Dämpfungsfaktor d_{Mssg} entsprechend Gleichung (26) ergibt. Der Dämpfungsfaktor d_D des Dämpfers wird daraus ermittelt als

$$d_{D \text{ Mssg}} = d_{\text{Mssg}} - d_{el} \quad (28)$$

wobei für $s = 0,8$ (entsprechend der errechneten Kurve in Bild 3) $d_{el} = -2 \cdot 10^{-3} \text{ kp ms}$ gesetzt wird. Der theoretisch zu erwartende Wert für d_D ergibt sich nach Umformung der Gleichung (18) zu

$$d_{D \text{ Rchg}} = \frac{\pi}{2} \frac{M_R}{\omega_p \hat{\Psi}} \quad (29)$$

Diese Gleichung zeigt nochmals, daß sich d_D umgekehrt proportional zu der Ausschlagamplitude $\hat{\Psi}$ verhält; die Einhüllende der Schwingung muß also eine gerade Linie sein. Die Oszillogramme *b* und *c* in Bild 8 bestätigen das, wenn man von sehr großen Amplituden absieht, bei denen die Drehmomentlinie der elektrischen Welle nicht mehr linearisiert werden darf, wie es die Rechnung zur Voraussetzung hat.

Bild	M_R kp cm	T_d s	d_{Mssg} kp ms	d_{el} kp ms	$d_{D \text{ Mssg}}$ kp ms	$d_{D \text{ Rchg}}$ kp ms
8 b	7,6	1,1	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$13,2 \cdot 10^{-3}$
8 c	19	0,27	$31 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$33 \cdot 10^{-3}$	$33 \cdot 10^{-3}$
9 a	61	$\sim 0,08$	$\sim 104 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$\sim 106 \cdot 10^{-3}$	$107 \cdot 10^{-3}$

Tafel 1 Vergleich der gemessenen und berechneten Dämpfungsfaktoren d_D des Schwingungsdämpfers

bei $s = 0,8$ und $\hat{\Psi} = 20^\circ \triangleq \hat{\dot{\Psi}} = 230 \text{ s}^{-2}$

Tafel 1 enthält die Auswertung der Meßergebnisse für eine Schwingungsamplitude $\hat{\Psi} = 20^\circ$, entsprechend einer Amplitude der Beschleunigungskurve $\hat{\dot{\Psi}} = \omega_p^2 \hat{\Psi} = 230 \text{ s}^{-2}$. Die Meßergebnisse stimmen mit der Rechnung überein und bestätigen die Richtigkeit der Theorie. Die Genauigkeit der Meßergebnisse ist jedoch bei kleinen Reibungsmomenten durch Ungleichförmigkeiten in der Reibungskupplung begrenzt und bei größeren Reibungsmomenten dadurch, daß eine Zeitkonstante nicht mehr genügend genau aus den Oszillogrammen ermittelt werden kann, da der ganze Schwingungsvorgang auch bei größeren Anfangsamplituden schon nach einer bis zwei Perioden abgeklungen ist.

Die Oszillogramme in Bild 9 zeigen, wie sich der Schwingungsdämpfer bei zu hoch gewählten Reibungsmomenten M_R verhält. Nach Abklingen der größeren Amplituden bleiben Restschwingungen mit einer Amplitude von etwa Ψ_R (nach Gleichung 21) erhalten. Wenn infolge negativer elektromagnetischer Dämpfung die Schwingung wieder angefacht wird, rutscht die Dämpfer-

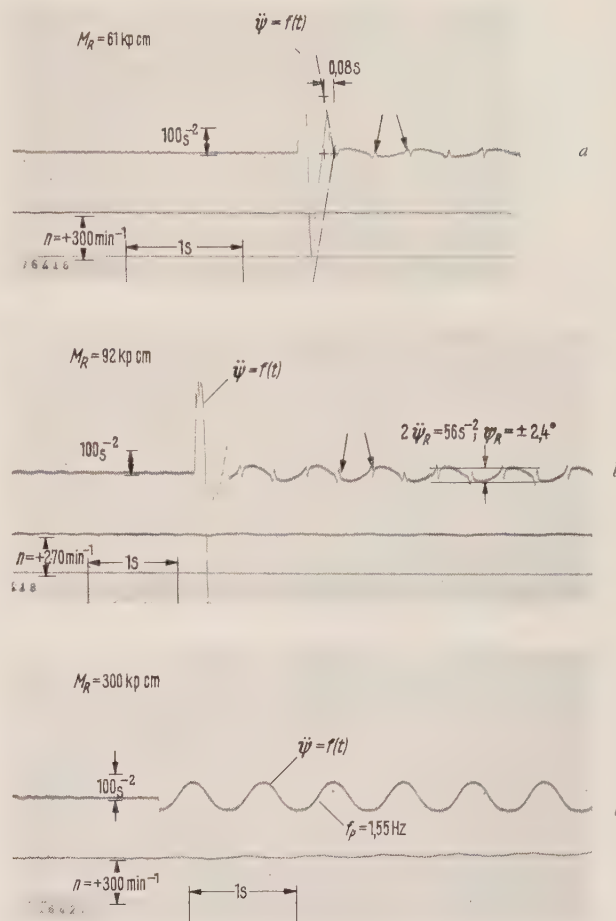


Bild 9 Oszillogramme der Drehbeschleunigung $\ddot{\Psi}$ bei Pendelungen einer elektrischen Welle für verschiedene Reibungsmomente M_R des Schwingungsdämpfers

kupplung durch und begrenzt die Amplitude, so daß sich resultierend eine ungedämpfte Pendelung mit konstantem Ausschlag Ψ_R einstellt. (In Bild 9 b ist z. B. $\hat{\dot{\Psi}}_R = \omega_p^2 \Psi_R = M_R / \Theta_D = 28 \text{ s}^{-2}$ und $\Psi_R = 2,4^\circ$.) Der Rutschvorgang im Schwingungsdämpfer zeigt sich in einem Zacken bei jeder Halbperiode der Beschleunigungskurve (s. Hinweispeile in den Oszillogrammen *a* und *b* in Bild 9). In Bild 9 c ($M_R = 300 \text{ kp cm}$) ist kein Rutschen der Kupplung zu erkennen, d. h., der Schwingungsdämpfer verhält sich wie eine starr gekuppelte Schwungmasse. Die wirksame resultierende Schwungmasse ergibt sich dann zu $\Theta_{\text{res}} = 0,0294 \text{ kp ms}$ und die Eigenfrequenz entsprechend Gleichung (25) zu $f_p = 1,54 \text{ Hz}$, was durch Bild 9 c bestätigt wird.

Wie die Meßergebnisse zeigen, kann das Verhalten des Schwingungsdämpfers durch zweckmäßige Wahl des Reibungsmomentes M_R den jeweiligen Erfordernissen angepaßt werden, so daß man die Konstruktion der Reibungskupplung zweckmäßigerweise mit einstellbarem Moment ausführt. Wird eine hohe Winkelgenauigkeit

bei normaler Schwingungsanregung verlangt, so genügen verhältnismäßig kleine Reibungsmomente. Der Schwingungsdämpfer ist in bezug auf die genaue Einstellung des Drehmoments nicht sehr empfindlich, sondern arbeitet in einem im Verhältnis 1 : 10 veränderbaren Momentbereich einwandfrei. Bei sehr starken fremderregten Schwingungen kann u. U. ein noch wesentlich stärkeres Reibungsmoment vorteilhaft sein, wobei dann allerdings etwas größere Restschwingungen zuzulassen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Schwingungsdämpfer an elektrischen Wellen ein vielseitig verwendbares Hilfsmittel ist, das der Verwendung dieser besonders wirtschaftlichen Gleichlaufeinrichtung auch unter schwierigen Betriebsbedingungen den Weg ebnen dürfte.

Schrifttum

- [1] Oertel, F.: Die elektrische Welle. E u. M **61** (1943) 569 bis 579
- [2] Ungruh, F.: Gleichlaufantriebe mit elektrischen Wellen. Elektro-Technik **42** (1960) 61 bis 63

- [3] Bock, L.: Elektrische Gleichlaufantriebe an Werkzeugmaschinen. ETZ-A **78** (1957) 632 bis 636
- [4] Geiler, L. B.: Elektrowellen für Drehstrom in den Elektroantrieben der spanabhebenden Werkzeugmaschinen. Deutsche Elektrotechnik **6** (1952) 433 bis 442
- [5] Jalla, M. F.: Les arbres électriques en regime statique. Rev. gén. Electr. **64** (1955) 631 bis 647
- [6] Scharstein, E.: Kippgrenze der Gleichlaufanordnung mit Hilfe von Asynchronmotoren. Arch. Elektrotechn. **28** (1934) 770 bis 774
- [7] Pfäffel, K.: Gleichlauf von Antrieben durch elektrische Wellen. BBC-Nachr. **24** (1960) 428 bis 440
- [8] Choudhury, S. A.: Selsyn applications and synchronising problems. BTH Activities, Rugby **25** (1954) 55 bis 67
- [9] Roch, A.: Der Krempelsatz und sein Antrieb. Melliand Textilber. **38** (1957) 598 bis 602 und 743 bis 745
- [10] Ungruh, F.: Pendelungen elektrischer Wellen und Maßnahmen zu ihrer Unterdrückung. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 437 bis 444
- [11] Jordan, H.: Selbsterregte Pendelungen einer elektrischen Welle. Jahrb. AEG-Forsch. **7** (1940) 91 bis 111
- [12] Ungruh, F.: Die Stabilität elektrischer Ausgleichswellen bei Speisung mit Drehstrom, Wechselstrom und Gleichstrom. Arch. Elektrotechn. **45** (1960) 373 bis 398
- [13] Jordan, H. und Schmitt, W.: Über die Unterdrückung der Pendelneigung elektrischer Wellen durch induktive und ohmsche Widerstände im Läuferkreis. AEG-Mitt. **31** (1941) 102 bis 106
- [14] Jordan, H.: Der Einfluß der ohmschen Ständerwiderstände auf die Stabilität einer elektrischen Ausgleichswelle. Arch. Elektrotechn. **40** (1952) 385 bis 391
- [15] Jordan, H. und Lax, F.: Die Unterdrückung selbsterregter Pendelungen elektrischer Wellen durch Gleichstromspeisung. Jahrb. AEG-Forsch. **9** (1942) 18 bis 29
- [16] Jordan, H. und Freise, W.: Drillschwingungen an Elektroantrieben und ihre Bekämpfung. Glückauf **95** (1959) 519 bis 525
- [17] Kovacs, K. P.: Elektrische Welle in Reihenschaltung. Bull. SEV **33** (1942) 443 bis 450

TECHNISCHE BERICHTE

Das EMD-Wähler-Amt Maribyrnong in Melbourne

VON KLAUS HAHN UND ROLF ZENNECK

Am 5. April 1961 nahm die Australische Postverwaltung (PMG) das Fernsprechamt Maribyrnong mit zunächst 2000 Anschlußeinheiten in Betrieb. Das im Stadtteil Maidstone von Melbourne errichtete Amt arbeitet nach dem Edelmetall-Motor-Drehwähler-System mit Markierung (EMD-System M). Bei dem sehr ausgedehnten, etwa 100 Ämter umfassenden Ortsnetz von Melbourne erwies sich die große Beweglichkeit, die dieses System in der Netzplanung ermöglicht, als besonders vorteilhaft [1, 2, 3]. So wurde anstelle der ersten Gruppenwahlstufe des EMD-Systems M eine zentral gesteuerte Richtungswahlstufe für Leitweglenkung eingefügt.

Die Gruppierung des Amtes ist einfach und übersichtlich (Bild 1). An die zweistufige Anrufsucherstufe schließt sich eine zweistufige Richtungswahlstufe für Leitweglenkung an (Bild 2). Von hier aus

verteilt sich der abgehende Verkehr auf die verschiedenen Richtungen. Im ankommenden Verkehr werden von den vier letzten Ziffern der siebenstelligen Teilnehmer-Rufnummern zwei Gruppenwahlstufen und die Leitungswahlstufe eingestellt. Dieser von den anderen Stadtteilen Melbournes ankommende Verkehr wird über Relaisätze C geführt.

Zu den Einrichtungen der Leitweglenkung gehören Relaisätze A und zentrale Speicher, die über Relais-Suchwähler miteinander verbunden werden. Die Speicher sind lediglich während der Leitweglenkung angeschaltet und damit nur in geringer Anzahl erforderlich. Ein zentraler Umwerter als Kernstück der Leitweglenkung (Bild 3) liefert den Speichern das erforderliche Programm. Die Richtungsziffern werden in einem »2-von-6«-Code übertragen, den der Umwerter unmittelbar an die Einstellsätze der Richtungswähler gibt. Alle zentralen Einrichtungen von Maribyrnong, wie Relais-Suchwähler, Speicher und Umwerter, sind mit Edelmetall-Schnellkontakt-Relais (ESK-Relais) ausgerüstet [4, 5]. Für die Anschaltung der Speicher enthält der Umwerter ein Prüfvieleck;

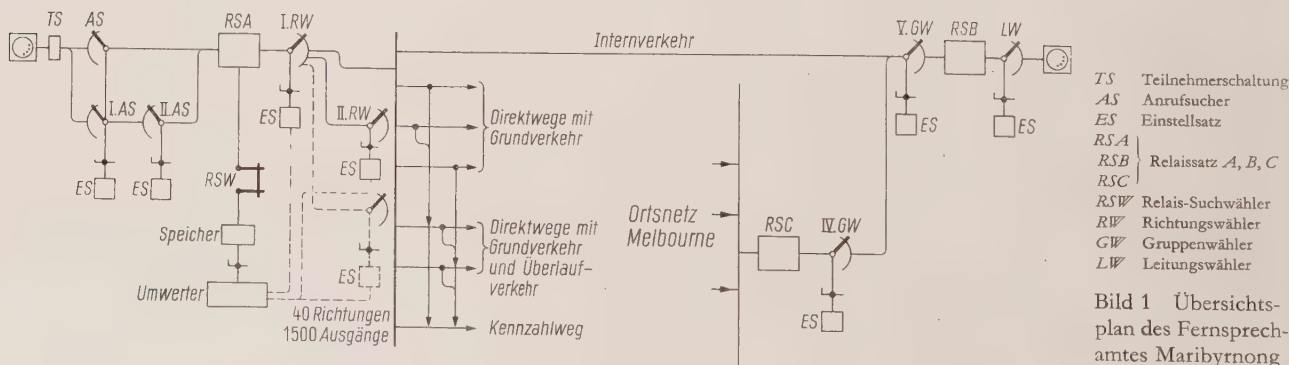




Bild 2 Gestellreihen
mit 220 teiligen
Richtungswählern

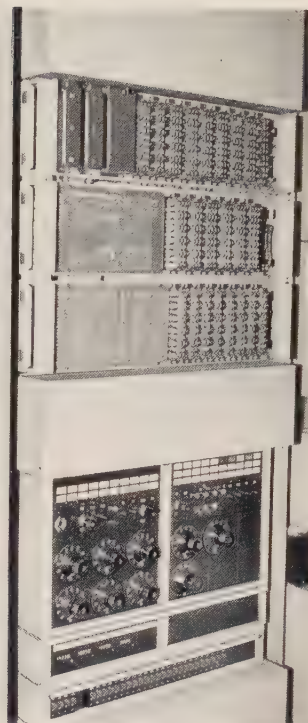


Bild 3 ESK-Umwerter
für Leitweglenkung und
Verzionung

dieses verhindert, daß zwei oder mehr Speicher gleichzeitig den Umwerter belegen können; es arbeitet mit Transistoren, die die erforderlichen Sperrbedingungen sicherstellen.

Die Einrichtungen des Amtes Maribyrnong können bis zu fünf Stellen der Rufnummern nach Richtung und Zone auswerten; z. Z. werden eine bis vier Ziffern bei der Leitweglenkung verarbeitet. Die über zwei Richtungswahlstufen auswählbaren 40 Richtungen – theoretisch sind 196 möglich – können auf 1500 Ausgänge verteilt sein. Von Maribyrnong führen gegenwärtig zwölf Leitungsbündel zu benachbarten Ämtern, u. a. nach Carlton, Sunshine, Brooklyn, North Melbourne, Footscray und Maribyrnong selbst. Der Verkehr zu Ämtern, die nicht auf dem Direktweg erreichbar sind, verläuft über das Hauptamt City West auf dem Kennzahlweg.

Neben dieser umfassenden Leitweglenkung können für die Gebührenerfassung zehn verschiedene Zonen ausgeschieden werden. Eine elfte Zone ist für die vom übergeordneten Amt aufgenommenen Zählimpulse bestimmt – eine Vorleistung auf die gesamt-australische Landesfernwahl.

Da der Verkehr über Richtungswahlstufen abgewickelt wird, lassen sich beim Internverkehr in Maribyrnong drei, in den Nachbarämtern zwei Gruppenwahlstufen einsparen. Darüber hinaus verringert sich der Aufwand an Leitungen und Übertragungen. Durch eine Überlauftechnik werden alle Leitungsbündel hoch ausgenutzt.

Im Hinblick auf den weiteren Ausbau des Fernsprechnetzes bietet die EMD-Technik des Amtes Maribyrnong weitere Vorteile, wie Anschluß von Münzfernsprechern für Selbstwählferngespräche,



Bild 4 Gebäude des EMD-Ortswählamtes Maribyrnong



Bild 5 Abtransport des bis zur Einschaltung von Maribyrnong bestehenden Fernsprechamtes

Gebührenanzeiger beim Teilnehmer, wahlweise Sperrung eines beliebigen Hauptanschlusses für abgehende Fernverbindungen und – bei großen Wahl-Nebenstellenanlagen – Durchwahl bis zur Nebenstelle ohne Inanspruchnahme der Nummernkapazität des öffentlichen Amtes sowie ohne Begrenzung in der Anzahl der Wahlziffern [6].

Maribyrnong wurde von der Australischen Postverwaltung installiert. Das Amtsgebäude ist nach neuzeitlichen Gesichtspunkten gestaltet (Bild 4). Wenige Informationsstunden während der Prüfarbeiten und nach der Übergabe des Amtes genühten, um das Personal mit der Technik und der Schaltung des EMD-Systems vertraut zu machen. Vier Tage nach der Einschaltung wurden die Einrichtungen des bisherigen Fernsprechamtes, das den Verkehr für 1000 Teilnehmer abgewickelt hatte, samt Gebäude auf einem Tieflader zu weiterer Verwendung an anderer Stelle abtransportiert (Bild 5).

Schrifttum

- [1] Laas, K. und Meigel, H.: EMD-Wähler-Technik in den USA. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 832 bis 837
- [2] Tietz, W.: EMD-Wähler-Ämter für Korea. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 126 bis 128
- [3] Braun, R.: Erotaja – ein neues Fernsprechamt in Helsinki. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 506 bis 508
- [4] Villmann, W. und Vogel, H.: Weitere Anwendungsbeispiele für Edelmetall-Schnellrelais. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 338 bis 340
- [5] Villmann, W.: ESK-Umwerter für die Landesfernwahl. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 220 bis 221
- [6] Töpfer, H. und Rohde, K.: Durchwahl bis zur Nebenstelle – ein Problem für öffentliche Fernsprechanlagen? Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 745 bis 751

Ton-Zusatzgerät für das Richtfunksystem FM 960-TV/4000

VON KARL JETTER

Jeder Radiofrequenz-Kanal des Breitband-Richtfunksystems FM 960-TV/4000 kann mit 960 Fernsprechkanälen (TF) oder mit einem Bildkanal (TV) ausgenutzt werden¹⁾. Um einen RF-Kanal zusätzlich zum Bildkanal mit einem hochwertigen Tonkanal (NF) belegen zu können, ist ein Ton-Zusatzgerät entwickelt worden.

Anforderungen. Das TV-Basisband reicht bis 5 MHz; die Pilotfrequenz beträgt 8,5 MHz. Dementsprechend wurde vom CCIR vorgeschlagen, für den Tonträger die Frequenz 7,5 MHz zu wählen (vgl. Bild 1). CCIR empfiehlt ferner für die Frequenzmodulation des Tonträgers einen effektiven Hub von ± 140 kHz. Die Amplitude

dieser frequenzmodulierten Schwingung soll am Eingang der Breitband-Modulationseinrichtung so groß sein, daß sich bei der (zweiten) Frequenzmodulation im Breitbandmodulator ein effektiver Hub von ± 300 kHz ergibt (Empfehlung 272, Los Angeles 1959).

Für den hypothetischen Bezugskreis von 2500 km Länge wird vom CCITT ein Geräuschabstand von 57 dB empfohlen; dabei ist dreimalige Demodulation angenommen. Für einen daraus abgeleiteten Modulationsabschnitt von 840 km Länge (entsprechend etwa 18 Funkfeldern) ergibt sich eine Geräuschabstandsfordernung von etwa 62 dB. Die Übertragungsbandbreite soll über 10 kHz hinaus bis auf 15 kHz ausgedehnt werden, um einen Hinweis des CCIR auf eine mögliche Erweiterung der bisherigen Empfehlungen zu berücksichtigen. Für die Klirr- und Verzerrungsfaktoren sowie für die Laufzeitverzerrungen gelten die erhöhten Forderungen der Deutschen Bundespost.

Arbeitsweise. Im Sendeteil des Ton-Zusatzes gelangt das NF-Signal über ein regelbares Dämpfungsglied an den Eingangsübertrager, der den Leitungswiderstand 600 Ω , symmetrisch, an den unsymmetrischen Eingang des Tonverstärkers (oder Modulators) anpaßt und die Leitung galvanisch vom Gerät trennt. Der Tonverstärker ist ein zweistufiger Verstärker hoher Güte; er kann bei ausreichend hoher Eingangsspannung abgeschaltet werden. Zusammen mit dem regelbaren Dämpfungsglied ergibt dies die Möglichkeit, auf einen relativen Eingangspegel von $-2,7$ bis $+2,8$ N und damit auf eine größte Nutzspannung von 0,14 bis 34 V einzustellen. Vor dem Eingang des Tonmodulators ist ein Regler zum Einstellen des Frequenzhubes vorgesehen. Der Modulator ist als freischwingender, induktiver Dreipunktoszillator aufgebaut.

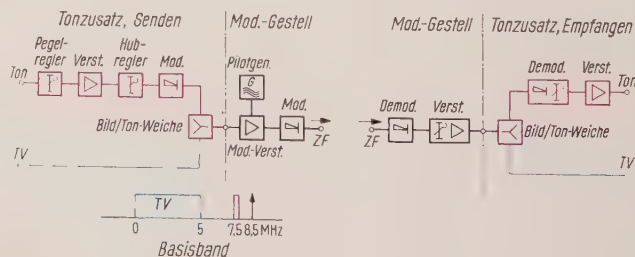


Bild 1 Zusammenfassung und Trennung von frequenzmoduliertem Tonträger und TV-Signal im Tonzusatz; Anschluß des Tonzusatzes an die Modulations-Einrichtung des Richtfunksystems FM 960-TV/4000

1) Christensen, P. und Holzwarth, H.: Ein Richtfunknetz zur Übertragung von Fernsehprogrammen und Bündeln von 600 Gesprächen in Dänemark. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 289 bis 296

Seine Schwingamplitude wird durch die parallel zum Anodenkreis liegenden Begrenzerdioden, durch einen Gegenkopplungswiderstand in der Kathodenleitung und durch Stabilisierung der Gitter-Kathodenspannung mit Hilfe einer Zenerdiode weitgehend konstant gehalten, so daß der Oszillator gegen Änderung der Temperatur, der Heizspannung und bei Röhrenwechsel äußerst unempfindlich ist. Über das Schirmgitter der Oszillatordröhre ist ein Meßkreis zur Kontrolle der Mittenfrequenz 7,5 MHz angekoppelt; sie kann nötigenfalls mit einem Trimmerkondensator auf genauen Sollwert nachgestellt werden. Zur Modulation der Oszillatorschwingung liegt dem Anodenkreis ein Netzwerk parallel, das durch einen symmetrischen Begrenzer abgeschlossen ist. Die Dioden dieses Begrenzers werden von dem zu übertragenden NF-Signal durchgesteuert; sie bewirken eine schwankende Bedämpfung des Netzwerkes, was eine Blindwiderstandsänderung an der Anode der Oszillatordröhre und damit Frequenzänderung bedeutet. Die von der Anode abgenommene, im Takte der NF-Spannung frequenzmodulierte Ton-Trägerschwingung wird – über ein regelbares Dämpfungsglied zum Einstellen des Ausgangspegels – der Bild/Ton-Weiche zugeführt.

Die sendeseitige Bild/Ton-Weiche schaltet das TV-Basisband und die frequenzmodulierte Ton-Trägerschwingung zusammen. Sie ist als Achtpol in Doppelbrückenschaltung – mit frequenzunabhängigem Wellenwiderstand an allen vier Klemmenpaaren – aufgebaut. Die für das Frequenzverhalten maßgebenden Filter sind zwei zueinander duale Bandpässe mit der Mittenfrequenz 7,5 MHz, und zwar durchläuft das Bildsignal eine Bandsperre mit der Sperrfrequenz 7,5 MHz, die Ton-Trägerschwingung einen Bandpaß mit der Durchlaßfrequenz 7,5 MHz.

Im Empfangsteil des Ton-Zusatzes trennt die Bild/Ton-Weiche sinngemäß in entgegengesetzter Richtung das TV-Basisband und die frequenzmodulierte Ton-Trägerschwingung durch Bandsperre und Bandpaß 7,5 MHz. Das TV-Basisband gelangt wahlweise unmittelbar oder über einen TV-Tiefpaß zur abgehenden Leitung; durch Demodulation der Ton-Trägerschwingung im Tondemodulator gewinnt man das ursprüngliche NF-Signal wieder.

Dabei durchläuft die mit effektivem Hub von ± 140 kHz modulierte Trägerschwingung im Tondemodulator einen Bandpaß und einen zweistufigen Verstärker mit dreifacher Amplitudenbegrenzung. Der darauffolgende Diskriminator besteht aus zwei gegeneinander verstimmt Schwingkreisen und zwei Dioden zur Gleichrichtung der Modulationsspannung. Ein regelbares Dämpfungsglied ermöglicht die Einstellung des Ausgangspegels, ein Tiefpaß vor dem Ausgang begrenzt das NF-Signal bei 15 kHz. Der im Gegensatz zum Sendeteil hier fest eingeschaltete Tonverstärker bringt das NF-Signal auf den geforderten Ausgangspegel. Außer dem Hauptausgang gibt es einen von diesem entkoppelten Mithörsausgang.

Aufbau. Im Sendeteil und Empfangsteil des Ton-Zusatzes werden die elektrisch und konstruktiv gleichen Baugruppen Bild/Ton-Weiche, Tonverstärker, Netzanschlußgerät und Überwachungsteil verwendet. Diese Baugruppen und die Baugruppen Eingangsübertrager und Tondemodulator ergeben den Einschub »Sendeteil« mit den äußeren Abmessungen 534 mm \times 100 mm \times 200 mm; mit der Tondemodulator-Baugruppe ergeben sie den Einschub »Empfangsteil« gleicher Größe. Beide Einschübe sind so bemessen, daß sie im Modulations-Gestell des Breitbandsystems untergebracht werden können, und zwar der Sendeteil anstelle eines Demodulator-Einschubes – wenn bei einseitig gerichtetem Betrieb die Demodulatoreinrichtung des Modulations-

Gestelles nicht bestückt ist –, der Empfangsteil anstelle des Modulators, wenn die Modulationseinrichtung des Modulations-Gestelles nicht benötigt wird. Ist das Modulations-Gestell für beide Richtungen bestückt, so können zwei Einschübe Ton-Zusatz in einem Gestellaufsatz 600 mm \times 510 mm \times 222 mm untergebracht werden (Bild 2); ein Ton-Zusatzgestell mit den Abmessungen 600 mm \times 1554 mm \times 222 mm nimmt bis zu acht solcher Einschübe auf. Sendeteil und Empfangsteil sind im Aufsatz und im Gestell beliebig vertauschbar, so daß jede gewünschte Bestückung möglich ist. Bei entsprechender Zusammenschaltung von Ton-Zusätzen mit Modulations-Gestellen und Umschalteteinrichtungen kann der Ton-Zusatz mit in die Streckenersatzschaltung einbezogen werden.

Erprobung und Betriebserfahrungen. Die Ton-Zusatzgeräte werden seit 1960 eingesetzt. Die guten Ergebnisse früherer Messungen an Versuchsstrecken wurden bestätigt. Es zeigte sich, daß die vom CCITT empfohlenen Geräuschwerte mit guter Reserve eingehalten werden, wenn im TV-Kanal normales Bildprogramm übertragen wird. Das gilt auch für solche Richtfunkstrecken, deren Laufzeitausgleich nur für TF-Übertragungen eingestellt ist. Die Intermodulationsgeräusche steigen jedoch an, wenn im TV-Kanal kritische Testbilder übertragen werden. Bei Strecken, die ausschließlich für Bild- und Tonübertragung vorgesehen sind, kann aber der Laufzeitausgleich der Streckengeräte so vorgenommen werden, daß die vom CCITT empfohlenen Geräuschabstände auch in diesem Fall nicht unterschritten werden. Der Frequenzgang der Restdämpfung, die Laufzeitverzerrungen und der Klirrfaktor im Tonkanal sind unabhängig von den Linearitätseigenschaften des Richtfunksystems und innerhalb eines Ton-Modulationsabschnittes auch unabhängig von der Anzahl der Funkfelder.

Gewährleistete Werte des Ton-Sendeteiles und -Empfangsteiles, im Schleifenschluß gemessen, sind:

Geräuschspannungsabstand: > 76 dB

Fremdspannungsabstand: > 62 dB

Dämpfungs-Frequenzgang: $\pm 0,5$ dB zwischen 100 und 8500 Hz
 $\pm 1,0$ dB zwischen 50 und 100 sowie 8500 und 10000 Hz
 $+1,5$ dB zwischen 30 und 50 Hz
 $-1,0$ dB | sowie 10000 und 15000 Hz

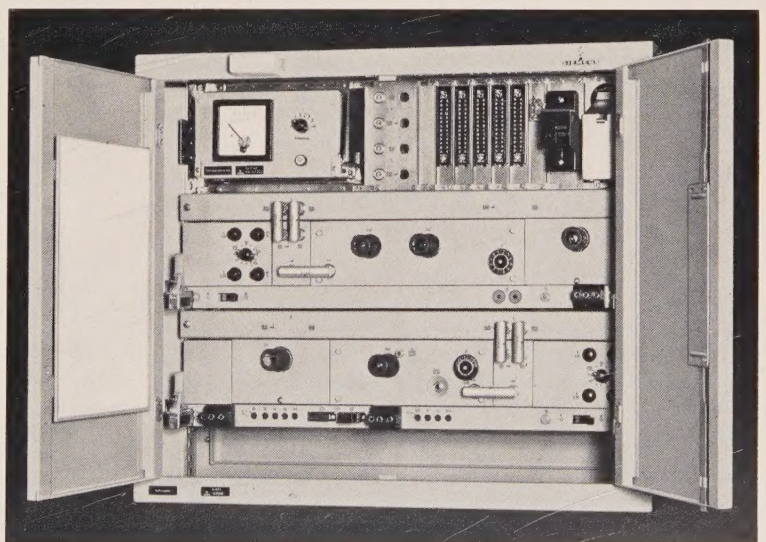


Bild 2 Gestellaufsatz 600 mm \times 510 mm \times 222 mm, bestückt mit Ton-Empfangsteil (Mitte) und Ton-Sendeteil (unten)

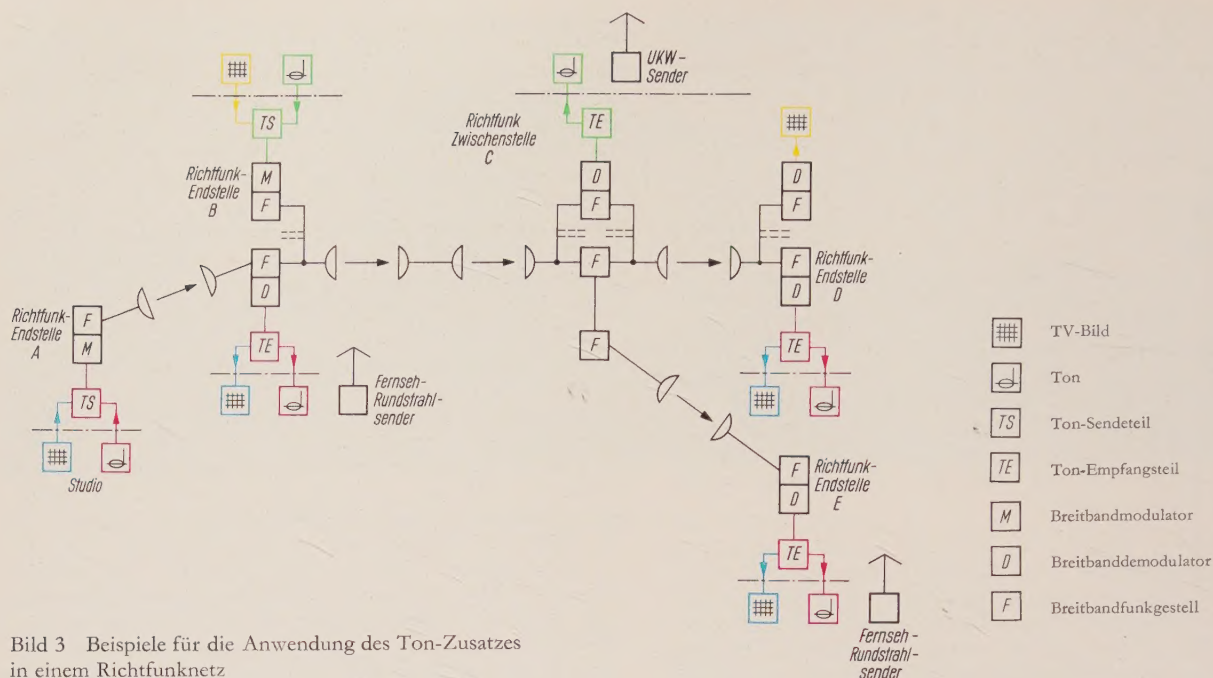


Bild 3 Beispiele für die Anwendung des Ton-Zusatzes in einem Richtfunknetz

Klirrfaktor:

$$\begin{aligned} k_3 &\leq 0,7 \% ; k_2 \leq 0,7 \% \\ &\text{(Mittelwerte für } k_2 \text{ und } k_3 < 0,3 \%) \\ v_3 &\leq 0,55 \% ; v_2 \leq 0,35 \% \end{aligned}$$

Laufzeitverzerrungen:

$$\begin{aligned} t_{50} - t_{\min} &\leq 9 \text{ ms} \\ t_{100} - t_{\min} &\leq 9,2 \text{ ms} \\ t_{10000} - t_{\min} &\leq 0,9 \text{ ms} \end{aligned}$$

Frequenzänderung des Ton-Trägers 7,5 MHz bei einer Umgebungstemperatur von 0 bis 40 °C: ± 20 kHz

Bild 3 zeigt Beispiele für die Anwendung des Ton-Zusatzes in Fernseh-Zubringerleitungen, in Fernleitungen sowie in Rundfunkmodulationsleitungen zwischen Aufnahmestudios, Weitverkehrs-ämtern und Rundstrahl-sendern: Die Endstelle A sendet nach B und über C nach D und E. In B, D und E steht das Bild- und Ton-signal zur Verfügung. Ein weiterer Bildkanal und ein davon unabhängiger Tonkanal werden von B aus belegt, der Ton in C entnommen und das Bild bis D geführt.

Selbsttätige Zuglenkung bei der Hamburger S-Bahn

VON WERNER FUNKE

Die Entwicklung der Eisenbahn-Signaltechnik hat dazu geführt, daß sie heute nicht nur zur Sicherung des Verkehrs, sondern auch zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei der Verkehrsabwicklung dient. Ein interessantes Beispiel hierfür bilden die neuen signal-technischen Anlagen auf dem S-Bahn-Abschnitt »Hamburg Hbf. – Berliner Tor«.

Durch die Elektrifizierung der bisher mit Dampfzügen befahrenen S-Bahn-Strecke »Berliner Tor – Bergedorf« und ihre Einführung in die Stammstrecke »Poppenbüttel – Blankenese – Wedel« ergab sich für den Abschnitt »Hauptbahnhof – Berliner Tor« eine starke zusätzliche Belastung. Für den Berufsverkehr mußte nunmehr hier mit einer Zugfolge von 60 s gerechnet werden. Für diese Zugdichte waren die vorhandenen Signalanlagen nicht eingerichtet. Auch der

starke Personenverkehr im Hauptbahnhof konnte nicht mehr allein über den Bahnsteig 1 mit den Gleisen 1 und 2 abgewickelt werden. Eine Erweiterung des Hauptbahnhofs oder eine dauernde Benutzung des bisher dem Fernverkehr dienenden Gleises 3 war aber nicht möglich.

Mit Hilfe der neuzeitlichen Signaltechnik wurde jedoch eine Lösung gefunden, den verstärkten Verkehr ohne Erweiterung der Gleisanlagen und ohne zusätzlichen Personalaufwand zu beherrschen. Das vorhandene Einreihen-Hebelwerk (Bauart VES 1912) im Hauptbahnhof wurde deshalb durch ein neuzeitliches Drucktasten-Gleisbildstellwerk mit selbsttätigem Einlauf der Weichen ersetzt (Bild 1). Außerdem erhielt dieses Stellwerk Zusatzeinrichtungen für Fahrstraßenspeicherung und für selbsttätige Zuglenkung. Von hier aus wird der gesamte S-Bahn-Verkehr sowohl im Hauptbahnhof als auch auf der Strecke bis einschließlich zur Abzweigung »Berliner Tor« gesteuert (Bild 2).

Der Verkehr im Hauptbahnhof wickelt sich während der verkehrsschwachen Zeit wie bisher über die Gleise 1 und 2 ab, nur während des Berufsverkehrs wird das Gleis 3 mitbenutzt. In dieser Zeit wird der Durchgangsverkehr über die Gleise 1 und 3 geleitet, Gleis 2 wird Kehrgleis für Züge aus Richtung Bergedorf. Das Gleis 3 steht also außerhalb der Hauptverkehrszeiten weiterhin dem Fernverkehr zur Verfügung. Durch Vorspeichern von Bedienungshandlungen und weitgehende Automatisierung vieler Betriebsvorgänge kann der Verkehr auch bei Belastungsspitzen ohne Überforderung des Fahrdienstleiters flüssiggehalten werden.

Die Wirkungsweise der Zusatzeinrichtungen zur Automatisierung des Betriebes soll hier kurz erläutert werden. Für Züge in Richtung »Berliner Tor« wird die Ausfahrt aus dem Hauptbahnhof und die Einfahrt nach »Berliner Tor« durch eine einzige Bedienungshandlung bewirkt, obwohl sich auf dem dazwischenliegenden Streckenabschnitt mehrere Züge befinden können. Beim Stellen der Ausfahrt wird gleichzeitig der Fahrstraßen-Auftrag für die Abzweigung »Berliner Tor« eingespeichert. Da sich auf der Strecke zwischen Hauptbahnhof und »Berliner Tor« in Ausnahmefällen bis zu fünf Züge befinden können, wurde ein aus fünf stufenförmig hintereinandergeschalteten Einzelspeichern bestehender Gesamtspeicher vorgesehen; dieser arbeitet so, daß die eingegebenen Informationen

(Fahrstraßen-Aufträge) nach der Ausfahrt des Zuges die folgenden Speicherstufen bis zur letzten freien Stufe durchlaufen. Dadurch wird erreicht, daß die Einfahrt nach »Berliner Tor« zum jeweils frühestmöglichen Zeitpunkt gestellt wird, d. h. nachdem alle vorangegangenen Züge die Strecke geräumt haben. Zur Kontrolle werden die gespeicherten Aufträge optisch im Stelltisch angezeigt. Die einzelnen Züge steuern selbst die Signale an der Strecke. Der Fahrdienstleiter wird also durch den Betrieb auf der Strecke und im Bahnhof »Berliner Tor« nicht in Anspruch genommen, da nach der Ausfahrt der Züge alle Vorgänge selbsttätig ablaufen. Ein weiterer Speicher ermöglicht es, bereits vor der Ausfahrt eines Zuges die Fahrstraße für den Folgezug zu speichern. Dadurch werden Zeitverluste vermieden, und der Fahrdienstleiter wird weiter entlastet. Auch in der Gegenrichtung läuft der Betrieb weitgehend selbsttätig ab. Die von Ohlsdorf und Bergedorf kommenden

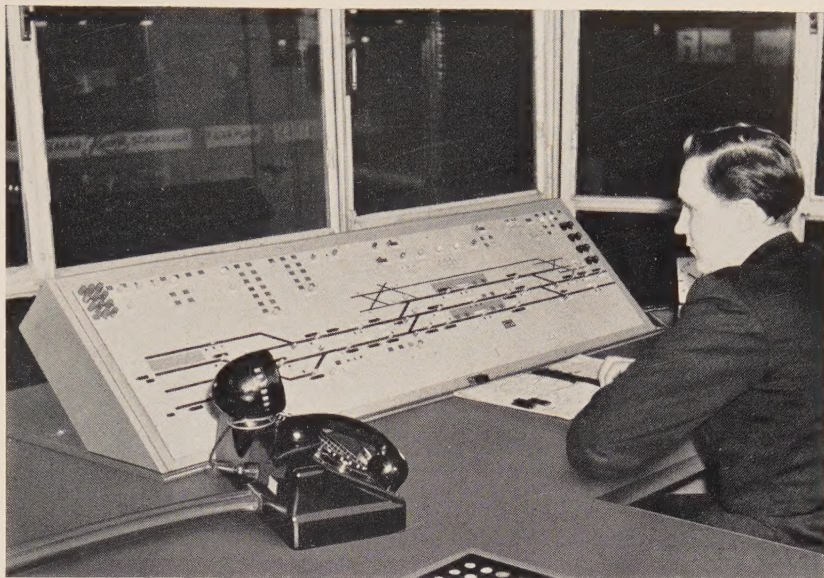


Bild 1 Gleisbildstelltisch für den S-Bahn-Verkehr im Hamburger Hauptbahnhof

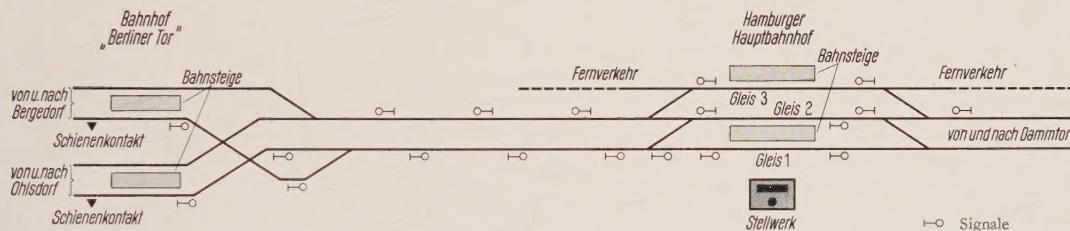


Bild 2 Lageplan der Hamburger S-Bahn, Strecke »Hauptbahnhof – Berliner Tor«

Züge befahren bei der Einfahrt nach »Berliner Tor« Schienenkontakte und leiten damit über einen vierstufigen Speicher den Einlauf ihrer Fahrstraßen ein. Im Hauptbahnhof wird während der verkehrsschwachen Zeit das Gleis 1 auf Durchgangsbetrieb geschaltet, so daß der gesamte Verkehr in dieser Richtung ohne Mitwirkung des Fahrdienstleiters abläuft. Nur während der Hauptverkehrszeit, in der das Gleis 2 als Kehrgleis für Züge, die im Hauptbahnhof enden, benutzt wird, stellt der Fahrdienstleiter die Ein- und Ausfahrt selbst; dabei kann immer eine Fahrstraße vorgespeichert werden. Die Entscheidung, in welches Gleis die Züge einfahren sollen, trifft der Fahrdienstleiter nach der Anzeige eines fünfstufigen Meldespeichers, der die jeweilige Herkunft der anrückenden Züge angibt.

Falls es die Betriebslage erfordert, kann der Fahrdienstleiter jederzeit in den automatischen Ablauf eingreifen und Fahrstraßen einzeln stellen. Das richtige Arbeiten der Anlage wird ständig überwacht. Im Falle einer Speicherstörung – womit bei der geringen Beanspruchung der Relais kaum zu rechnen ist – wird lediglich der betreffende Speicher automatisch ausgeschaltet. Das eigentliche Stellwerk arbeitet also praktisch ungestört weiter. Die Bauteile für Fahrstraßenspeicherung und diejenigen für selbsttätige Zuglenkung sind in einem besonderen Relaisgestell zusammengefaßt. Die Speicherstufen wurden als einheitliche Baugruppen mit Fernmelderelais ausgeführt. Die Baugruppen sind steckbar und können dadurch bei Bedarf leicht ausgewechselt werden.

BUCHBESPRECHUNGEN

LICHTSTRAHL-OSZILLOGRAPHEN
PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN · TECHNISCHER AUFBAU
MESSTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN · PRAKTISCHE ANWENDUNG

VON W. HÄRTEL, J. DEGENHART, A. KÜBLER,
CHR. SÖRENSEN UND J. TRÖGER

462 Seiten, 244 Bilder und Tafeln, 35 erläuterte Oszillogramme.
Preis Ganzleinen 64 DM. R. Oldenbourg, München, 1961

Mit diesem Buch ist ein lang erwartetes Werk erschienen, das erstmalig eine eingehende Zusammenfassung der theoretischen und praktischen Grundlagen über Lichtstrahl-Oszillographie

bringt. Es dürfte besonders bei dem Meßtechniker als Stütze und Ratgeber Anklang finden.

Die in dem Handbuch enthaltenen Ausführungsbeispiele beziehen sich auf den neuesten Stand der Lichtstrahl-Oszillographen des Wernerwerks für Meßtechnik, das über eine langjährige Erfahrung auf diesem Gebiet verfügt.

In Teil 1 werden die Meßwerke, d. h. die Schwinger, beschrieben, die man wohl als einen der wichtigsten Teile des Lichtstrahl-Oszillographen bezeichnen kann. Hierbei wird das Prinzip der einzelnen Schleifen und Spulenschwinger, deren Dämpfung,

Eigenfrequenz und Aufzeichnung sowie die wattmetrische Oszillographie mit mehreren Bildern sehr gut veranschaulicht. Einen breiten Raum nimmt auch die Beschreibung der Aufzeichnungsoptik der neuesten Siemens-Lichtstrahl-Oszillographen ein. Auf die Aufnahmetechnik — Inbetriebnahme, Auswahl der Schwinger, fotografische Technik, Anzeigefehler der Meßwerke und Anzeigefehler beim Oszillographieren — ist hierbei besonders eingegangen.

Teil 2 bringt eine Reihe interessanter Anwendungsbeispiele aus der Praxis für den allgemeinen Bereich der Meßtechnik, so u. a. Kraft- und Druckmessung, Drehmomentmessungen, Schwingungsmessungen, Messungen von Regel- und Schaltvorgängen.

Teil 3 gibt eine Gesamtübersicht über die Meßwerke, deren Kenndaten und Dämpfungsgrade in Tafeln und Bildern und über Aufnahmemöglichkeiten mit dem OSZILLOGRAPH.

E. Buschlinger

ERDUNGEN IN WECHSELSTROMANLAGEN ÜBER 1 kV. BERECHNUNG UND AUSFÜHRUNG

Von W. KOCH. Dritte neu bearbeitete Auflage, 228 Seiten, 112 Bilder. Preis Ganzleinen 22,50 DM. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1961

Die Neuauflage dieses Standardbuches der Erdungstechnik, in dem die Grundlagen der Bemessung von Erdungsanlagen zusammengefaßt sind, war notwendig geworden, nachdem im November 1958 eine neue Fassung der VDE-Vorschriften für Erdungen in Wechselstromanlagen von 1 kV und darüber (VDE 0141) in Kraft gesetzt war.

Die genannten VDE-Bestimmungen, deren Geschichte der Verfasser als Vorsitzender dieser VDE-Kommission wie kaum ein anderer kennt, werden in ihren Einzelheiten erläutert. Besonders ausführlich werden die Bestimmungen über den Zusammenschluß und die Trennung von Erdungen behandelt, die in VDE 0141/11,58 wesentlich verändert wurden.

Um Erdungsanlagen für große Erdkurzschlußstrom-Belastungen bei ausreichender Sicherheit mit einem vertretbaren Aufwand ausführen zu können, ist eine hinreichende Kenntnis des Verlaufs des Erdbodenpotentials erforderlich. Es ist deshalb zu begrüßen, daß in den Abschnitten über die Berechnung von Erden und Erdungsanlagen diese Unterlagen erweitert wurden.

In einem neu aufgenommenen Abschnitt wird die Bemessung der Erdungsleitungen von Kabeln behandelt. Anhand einer Anzahl von Abbildungen wird das Einbringen verschiedener Arten von Tiefenerden erläutert.

Bei einer Reihe von Anlagen ist es wichtig, zu wissen, in welchem Maß Gleise als Erder wirken. Dieses Problem wird jetzt eingehender untersucht und durch Zahlenwerte erläutert. In einem besonderen Abschnitt werden diejenigen Punkte zusammengefaßt, die bei der Einführung von Fernmeldeleitungen in den Spannungstrichter von Hochspannungs-Erdungsanlagen zu beachten sind.

Viele Betriebserfahrungen und Meßwerte sind in diesem Buch zusammengetragen, das sowohl der verantwortungsbewußte projektierende Ingenieur als auch der in der Praxis stehende Betriebsingenieur gern zur Hand nehmen wird.

K. H. Feist

STARKSTROMTECHNIK FÜR DIE PRAXIS

Von F. RUDOLF. Dritte neu bearbeitete Auflage, 408 Seiten, 348 Bilder, 12 Tafeln. Preis Ganzleinen 28 DM. R. Oldenbourg, München, 1961

Die Tatsache, daß die zweite Auflage dieses bemerkenswerten Handbuches in kurzer Zeit vergriffen war, zeigt das große Interesse der Fachkreise für dieses Buch, das für den in der Praxis stehenden Elektriker bestimmt ist.

Die soeben erschienene dritte Auflage berücksichtigt die inzwischen weiter entwickelte Technik, ohne daß die bewährte Einteilung des Stoffes geändert wurde.

Aufbauend auf einfachen Überlegungen führt der Verfasser in die Grundgesetze der Elektrotechnik ein. Rechenbeispiele sollen den Leser zum Mitarbeiten anregen und zeigen die Anwendung der erkannten Gesetze in der Praxis. Der Verfasser hat es verstanden, auch etwas schwierigere Gebiete, wie z. B. die Wechselstromrechnung, ohne umfangreiche theoretische und mathematische Erörterungen so leichtverständlich darzustellen, daß damit jeder Praktiker ohne weiteres in den Stand gesetzt wird, die meisten in der Starkstromtechnik vorkommenden Wechselstromkreise zu berechnen.

Von den Grundkenntnissen ausgehend führt das Buch zur Anwendung in der Praxis über. In sehr klarer Weise werden die Maschinen, Gleichrichter und Kondensatoren sowie die Technik der Stromversorgung behandelt. Auch diese Abschnitte zeichnen sich durch Herausheben des Wesentlichen und Berücksichtigung der für die praktische Anwendung wichtigsten Erkenntnisse aus. Auf bemerkenswert kleinem Raum findet der Fachmann hier eine Fülle von Angaben übersichtlich dargestellt, die ihm für den praktischen Betrieb nützlich sind. Daß dabei auch auf spezielle Dinge, wie z. B. Aufbau der Maschinenwicklungen, Parallelbetrieb von Maschinen und Transformatoren, Kurzschlußschutz von Gleichrichtern eingegangen wird, zeigt, mit welcher Gründlichkeit der Stoff zusammengestellt wurde.

Ein besonderer Abschnitt behandelt die Starkstromschaltungen. Von einfachen bis zu komplizierteren Schaltungen fortschreitend, wird der Aufbau von Schaltplänen erklärt. Durch zahlreiche Schalt-Ergänzungs-Aufgaben wird der Leser zur Mitarbeit angeregt.

Ein in der vorliegenden Auflage bedeutend erweiterter Bildteil zeigt kennzeichnende Ausführungsformen der behandelten Maschinen und Geräte und vermittelt damit auch demjenigen Leser eine Vorstellung, der noch keine Gelegenheit hatte, diese Geräte in der Praxis kennenzulernen.

Das Buch soll in erster Linie ein Leitfaden für die Ausbildung im Grundwissen des Starkstromelektrikers sein. Es wird dem Lehrling zur Unterstützung des Fachunterrichts ebenso gute Dienste tun, wie dem Fachmann, der sich im Selbststudium weiterbilden will; beiden wird es nach Erreichen des Ausbildungsziels im Beruf ein immer wieder gern zu Rate gezogenes Nachschlagewerk bleiben. Darüber hinaus wird auch der in der Betriebspraxis stehende Fachmann gerne darauf zurückgreifen, um sich über ihm weniger geläufige Sonderfragen zu unterrichten.

Auch dem Fachlehrer und dem Ausbilder wird dieses Buch Anregungen zur Ausgestaltung seines Unterrichtes geben können.

E. Schmidt